

# 臨海部コンビナート施設の地震リスクマネジメント ガイドライン

2016年 3月

コンビナート施設の地震リスクマネジメント研究会

早稲田大学東京安全研究所  
一般財団法人 産業施設防災技術調査会

## はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、東北地方から関東地方の沿岸部に甚大な被害をもたらした。特に臨海部のコンビナート施設においては、石油関連施設が被災し、地震・津波による被災地への製品供給に大きな支障が生じるとともに、被災地以外の広範な地域にもその影響がおよんだ。

臨海部コンビナート地域は、一般に埋め立て地や造成地上にあり、地盤が軟らかいため地震動が大きくなり、かつ液状化が発生する可能性が高い。さらには津波の襲来も考えられる。大きな地震が発生すると、コンビナート自体が高度に複雑な構成要素からなっているシステムであるうえに、強く長い揺れ、液状化、津波など様々な災害発生要因が重なり、複合災害につながる危険性が極めて高いといえる。

臨海部コンビナートは、石油精製、石油化学、エネルギー施設等の危険物を扱う事業所が集中しており、施設間の延焼や危険物の周辺居住地、港湾・航路への漏洩・拡散の二次災害発生の可能性も高い。

南海トラフの巨大海溝地震や首都直下地震の発生が迫っており、現状のままこれら地震が発生すると、関東から西日本にかけての臨海部コンビナート施設には甚大な被害が発生することが予想される。戦後日本の経済を支えてきた臨海部コンビナートに大きな被害が発生すると、ただ単に石油や化学製品等の物流が停止するにとどまらず、多くの工業製品のサプライ・チェーンの寸断にもつながり、国民生活はもとより、我が国の社会・経済活動、さらには世界経済にも甚大な悪影響を及ぼすことになる。

このような背景から、臨海部コンビナートを形成する各事業所には、ある日突然襲ってくる地震に対しても安全に停止すること、危険物の隔離、およびこれらによる大規模二次災害の防止、あるいは製品供給の継続、さらには早期事業再開等を目的とした様々な準備が求められている。しかしながら現状は必ずしもそうっておらず、それを進めることが喫緊の課題となっている。

この対策の策定・計画には、まず現状での地震被害をしっかりとイメージし、それによる事業停止が長期化する被害要因や対策の優先順位を把握するなど、科学的根拠に基づいた調査、分析が必要になる。また、対策を実施する場合には、対策に伴う投資は適正か、費用対効果は十分あるのかなど、個々の事業計画や経済的事由にも配慮が必要である。

このような要求には、リスクの定量化技術を基本とした地震リスクマネジメントが有効である。また、各事業所のリスクに関する情報は、二次災害の防止や軽減、さらには被災地域以外を含めた広域を俯瞰した安全性の確保、ならびに供給不足を補完するための事業者間連携において、有効な検討材料となる。そこで、リスク定量化技術の一般化、リスク情報の統一、一定の品質・精度の確保等を目的とした地震リスクマネジメントの標準化が必要になり、地震リスクマネジメントを実現するためのガイドラインが必要で

ある。

事後の対応よりも事前の対策のほうが、はるかに経済的負担が少なくなることは東北地方太平洋沖地震後の復旧、復興に多大な時間と膨大な経費をかけているにもかかわらず、なかなか事業が進まないことから明らかである。

このような観点から、地震災害における事前防災の考えを前提に、この「臨海部コンビナート施設の地震リスクマネジメントガイドライン」を策定した。本ガイドラインは、それを構成する大半の事業所が私企業であるにもかかわらず、臨海部コンビナート施設を社会全体にとっての共通の財産である社会的インフラ、すなわち社会的共通資本の一種と考え、地震による二次災害の防止、経済活動や国民生活への影響の最小化を図るために、臨海部コンビナート施設を対象に、地震リスク評価、リスクマネジメントの標準化を示したものである。

本ガイドラインは1. 序説、2. 地震リスク評価、3. 地震リスクマネジメント、4. 地震リスク情報の有効活用と情報プラットフォームの4部構成である。1. ～3. は地震リスクマネジメントを具体的にどう進めるかという技術的な内容で、4. は考え方、その必要性を述べたものである。したがって、まずは4. を読んでいただき、地震リスクマネジメントの重要性、必要性を理解いただき、その後に1. ～3. を読み具体的な手順を理解していただいても良いのではないかと思う。事業所の経営に携わっている方々には是非4. を読んでいただきたい。1. ～3. を理解するには耐震工学、信頼性工学、システム工学、経営工学、確率論などのかなり専門的知識を要するので、実際に地震リスクマネジメントを策定される際には専門家の支援を受けられるのも一方策と思う。

一事業所でも多く、一人でも多くの関係者にこのガイドラインを読んでいただき、一日も早く多くの臨海部コンビナート施設で地震リスクマネジメントが進むこと切に願っている。それは多くの日本国民の安全と安心を担保するものであるから。

「コンビナート施設の地震リスクマネジメント研究会」研究会委員長  
山口大学大学院理工学研究科  
三浦 房紀

## 「臨海部コンビナート施設の地震リスクマネジメントガイドライン」の 発行にあたって

1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震など国内外の既往地震により臨海部の産業施設は、液状化・津波・長周期地震動によって度々被害を受けてきている。

平成24年に成立した「国土強靱化基本法」の基本方針の一つに「国家及び社会の重要な機能が致命的な障害を受けないこと」が挙げられている。臨海部の産業施設群は、わが国の経済と社会を支える社会基盤の一つとして位置づけられ、産業施設の強靱化はこの基本法の基本方針に直接関係するものである。基本法の成立を受け、経済産業省は平成25年度より「産業・エネルギー基盤強靱性確保調査事業」を、平成26年度からは「石油インフラ強靱化事業」を施行している。

本ガイドラインは、臨海部産業施設の地震・リスクを適切に評価し、これをマネジメントするための手法と情報の提供を行って、効果的な強靱化事業を推進することを目標としている。

このため、基礎資料の収集と分析は、公益財団法人「セコム科学技術振興財団」の支援により、特定非営利活動法人「国境なき技師団」が実施した。早稲田大学東京安全研究所はこれら基礎資料の提供を受け、関連分野の有識者による「コンビナート施設の地震リスクマネジメント研究会」を組織し、本ガイドラインの策定を行った。

ここに、セコム科学技術振興財団の支援に対して深甚なる謝意を表する次第である。

特定非営利活動法人 国境なき技師団 理事長  
早稲田大学名誉教授 濱田 政則

## 「コンビナート施設の地震リスクマネジメント研究会」委員名簿

一般財団法人 産業施設防災技術調査会

区分	氏名	所属
委員長	三浦 房紀	山口大学 大学院理工学研究科
幹事	中村 孝明	一般財団法人産業施設防災技術調査会
委員	秋山 成樹	昭和四日市石油株式会社 四日市製油所 工務部 装置管理課
	井出 修	応用地質株式会社 社会システム事業部
	岩本 典丈	中電技術コンサルタント株式会社 臨海・都市部 臨海計画グループ
	金舛 能史	日特建設株式会社 技術本部 技術営業部
	木全 宏之	高圧ガス保安協会 高圧ガス部 保安業務課
	木村 育正	株式会社技研製作所 工法事業部
	桐山 和幸	コスモ石油株式会社 製造技術部
	小山田賢治	高圧ガス保安協会 高圧ガス部 保安業務課
	坂井マスミ	水源環境保全・再生かながわ県民会議
	佐藤 孝治	神奈川大学 経済学部
	静間 俊郎	株式会社篠塚研究所
	庄司 正弘	株式会社構造計画研究所 社会基盤営業部
	副島 紀代	株式会社大林組 技術研究所 構造技術研究部
	土屋 光弘	西松建設株式会社 土木設計部 設計1課
	坪田 正紀	株式会社構造計画研究所 防災ソリューション部
	奈良 吉倫	玉野総合コンサルタント株式会社 東京支店
	萩原 貴浩	指定海上防災機関（海上保安庁長官指定）一般財団法人海上災害防止センター
	長谷川圭司	昭和シェル石油株式会社 製造部工務課
	原田 健二	株式会社不動テトラ 地盤事業本部 技術部
	堀江 啓	株式会社インターリスク総研 総合企画部
	三輪 滋	飛島建設株式会社
	森重 秀敬	出光興産株式会社 製造技術部 総括課 設備安全グループ
	山田 岳峰	鹿島建設株式会社 土木技術部
	吉田 幸弘	株式会社インターリスク総研 災害リスクマネジメント部
事務局	勝沢 勝栄	一般財団法人産業施設防災技術調査会
	志毛 宏次	一般財団法人産業施設防災技術調査会
作業部会	望月 智也	株式会社篠塚研究所

「コンビナート施設の地震リスクマネジメント研究会」の活動経緯

第1回	平成27年 4月 8日 (水)	研究会活動方針の確認、技術紹介
第2回	平成27年 6月10日 (水)	ガイドライン(案)の検討、技術紹介
第3回	平成27年 8月26日 (火)	ガイドライン(案)の検討、技術紹介
第4回	平成27年11月 4日 (水)	ガイドライン(案)の検討、技術紹介
第5回	平成28年 1月15日 (金)	ガイドライン(案)の検討
第6回	平成28年 3月25日 (金)	まとめ

ご案内

「臨海部コンビナート施設の地震リスクマネジメントガイドライン」は、一般財団法人 産業施設防災技術調査会のホームページに掲載しております。

<http://idmc.or.jp/>

## 目 次

1. 序説	1
1.1 ガイドラインの位置付け	1
1.2 地震リスクマネジメントの目的と特徴	2
1.3 ガイドラインにおける地震リスクの定義	3
1.4 地震リスクマネジメントの目標と対象機能	5
1.5 地震リスク評価の範囲とマネジメントの範囲	5
1.6 地震リスク評価における配慮すべき点	6
1.7 地震リスクマネジメントの実施体制	6
2. 地震リスク評価	7
2.1 地震リスク評価の項目と流れ	7
2.2 臨海部コンビナート施設の情報収集と分析	8
2.2.1 情報収集と分析	8
2.2.2 ウォークダウンの実施	8
2.3 ハザードの設定	9
2.3.1 ハザードの基本的考え方	9
2.3.2 地震危険度の設定	9
2.3.3 津波危険度の設定	12
2.4 地盤増幅特性と液状化危険度の評価	15
2.4.1 地盤増幅特性の評価	15
2.4.2 液状化危険度の評価	17
2.5 地震リスク評価モデルの作成	18
2.5.1 被害要因の抽出と機能復旧期間	18
2.5.2 ユニットの分類	19
2.5.3 コンポーネントの分類	19
2.5.4 イベントツリー/フォールトツリーの活用	20
2.5.5 システムモデルの作成	22
2.6 フラジリティカーブの評価	23
2.6.1 フラジリティカーブの評価	23
2.6.2 不確実性の設定	25
2.6.3 耐震性能の評価	28
2.6.4 耐力値の工学的基盤での最大加速度換算	28
2.7 地震リスク評価	30
2.7.1 ターゲット地震の選定	30
2.7.2 復旧曲線の評価	32
2.7.3 健全度曲線の評価	34

2.7.4	システムの復旧期間と復旧期間の超過確率関数	35
3.	地震リスクマネジメント	37
3.1	目標の照査と対策の要否	37
3.2	地震対策	38
3.2.1	地震対策の分類	38
3.2.2	ハード対策, ソフト対策, および金融対策の判断の流れ	40
3.3	ハード対策の優先順位	42
3.4	対策と効果の検討	44
3.4.1	対策選定の目標と方針	44
3.4.2	対策事業の効果の検討	45
3.4.3	対策事業の費用対効果の検討	46
3.4.4	ライフサイクルコストによる検討	47
3.5	過去の被害事例に拘らず様々な被害の可能性を考慮する	48
3.6	緊急停止基準の検討	49
3.7	ICSの導入の検討	51
4.	地震リスクマネジメントの運用と利活用	52
4.1	防災は一貫性と継続性を	52
4.2	隣接する事業者間の広域連携	52
4.3	地域住民との情報共有とリスクコミュニケーション	55
4.4	評価の見直しと改善	55
4.4.1	事業所の変化による見直し	55
4.4.2	外生要因の変化への対応	56
4.5	地震リスク情報の有効活用と情報プラットフォーム	56
付録：技術資料		
付録－1	用語の定義	付-1
付録－2	地震リスクの評価例	付-4
付録－3	耐力中央値の評価方法	付-25
付録－4	地盤の非線形性を考慮した損傷確率の評価	付-27
付録－5	超過確率の積分による平均値	付-32
付録－6	地震リスク評価におけるサンプルアプローチと応答スペクトル法	付-33
付録－7	損傷相関の評価方法	付-37
付録－8	過去の被害事例	付-42

## 1. 序説

### 1.1 ガイドラインの位置付け

本ガイドラインは、臨海部コンビナート施設を対象とした地震リスク評価の基本的考え方、方法を示すとともに、事業所に求められる機能（製品製造、製品出荷等）を確保するためのリスクマネジメント手法を解説する。

#### 【解説】

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、東北地方から関東地方の沿岸部の広範囲にわたり甚大な被害をもたらした。特に臨海部のコンビナート施設では、石油製品の供給拠点である製油所、油槽所が被災し、被災地等への石油製品の供給に深刻な支障が生じた。また、この影響は被災地域外の地域にも波及した。

南海トラフの巨大海溝地震や首都直下地震等の発生の逼迫性が指摘されている。これらの地震により関東から西日本にかけての臨海部コンビナート施設に甚大な被害が予想され、我国の社会・経済や産業活動、さらには国民生活にも重大な影響を及ぼすことが懸念される。

コンビナート施設の所有者、管理者等は、効果的に地震対策を実施し、大地震に対して甚大な被害を生じさせず、コンビナート施設に求められる機能（製品製造、製品出荷等）を確保しなければならない。

臨海部のコンビナート施設の防災を考える時に、立地する石油タンクや製油所などの土地が公有地か民有地かということがしばしば問題とされるが、コンビナート施設の被害としては液状化や側方流動による直接的な被害に止まらない広範な被害が発生する可能性が高く、コンビナート施設の公共的性格が問われる。つまり、石油タンクや製油所などに甚大な被害が出るだけでなく、災害の複合的性格により広域的な外部不経済が発生する可能性が高い。このため、コンビナート施設は、道路、上下水道、公共的な交通機関、電力、通信施設などの社会的インフラと同様に、社会全体にとっての共通の財産、つまり社会的共通資本と考えられる。

そのためには、地震防災における事前防災の考え方のもとに、コンビナート施設の防災対策を進める必要がある。このような事前防災の考え方は、環境政策における予防原則（予防的取り組み）の考え方に一部示唆を得たものである。有機水銀により甚大な被害をもたらした水俣病では、水銀による水質汚染の防止措置と発生した水俣病患者の被害補償の間では、事前の水質汚濁除去装置の導入による公害予防の措置の方がはるかに低コストであったことは自明のことである。

1956年に発生が確認された水俣病は、日本の高度経済成長期に発生した四大公害病の一つである。環境大臣の私的懇談会の報告「水俣病問題に係る懇談会提言書」<sup>1)</sup>は、水俣病公式確認から50年を迎えるにあたって、水俣病問題の社会的・歴史的意味を包括的に検証し、その教訓のもとに、今後取り組むべき行政や関係方面の課題を提言したものである。

同提言書では、「水俣病事件の教訓を国家レベルで未来に向かって真に生かそうとするな

ら、国家の安全にかかわる既存の危機管理体制と並んで、国民1人1人の日常における「いのちの安全」を守るためのもう一つの危機管理体制を確立することを21世紀型政治政策の最重要課題」として強調し、同報告書の最期に「6. 未来へのメッセージ」として次のように述べている。

「水俣病事件が提起した問題やそこから読み取るべき教訓は、行政の領域にとどまらず、さまざまな領域におよんでいる。それらはいずれも水俣病事件にだけに限られた特殊なものではなく、その後に起きた公害事件、環境破壊、薬害、食品公害、災害などにおいて、繰り返し問題点として指摘されるなど、普遍的な性格を持つものである。」

同提言書から読み取るべきことは多くあるが、少なくとも環境政策の予防原則の重要さと統合機能（リーダーシップ）の必要性は、地震防災を考える上でも示唆に富んでいる。環境政策で比較的自明の見方となっている予防的取り組みを行う方が公害発生後の補償や事後の環境対策よりも低コストであるという環境政策の知見を、コンビナート施設の地震防災の基本的な理念の中に取り入れるべきである。また、統合機能という考え方は、後述するICS（Incident Command System; 現場指揮システム）とも相通じるものがある。

このような考え方を前提に、臨海部コンビナート施設を対象とした地震リスク評価ならびにリスクマネジメントの標準化を行うのが本ガイドラインの位置付けである。適切な地震リスクマネジメントの実施は、企業が社会的責任を果たすことや企業の社会的評価の向上にも結びつくものである。

## 参考文献

- 1) 環境省ホームページ: 「水俣病問題に係る懇談会」提言書,  
<https://www.env.go.jp/council/toshin/t26-h1813/honbun.pdf>, (平成18年9月)。

### 1.2 地震リスクマネジメントの目的と特徴

地震リスクマネジメントは、対象となる臨海部コンビナート施設の地震リスクを確率論的な手法により評価し、それをもとに臨海部コンビナート施設の機能が喪失する被害要因を抽出して、具体的かつ効果的な対策の検討・実施に資することを目的とする。

#### 【解説】

地震リスクマネジメントは、検討対象とする地震の設定方法、被害の推定方法、経済的対策の選定方法などに関し、合理的な判断基準を示すとともに、効率的な事前対策を提供する体系化された意思決定支援の枠組みである。地震リスク評価では、個別に設計あるいは耐震診断された各種構造物の役割を、臨海部コンビナート施設の機能という面から統合し、施設全体の機能の健全性を評価するのが特徴であり、致命的な被害要因や問題の発見を容易にする。また、確率論的手法を使うことで最悪を含めた様々な被害を網羅的に評価するため、被害の見逃しを最小限にすることも特徴である。

一方、事業継続計画（BCP; Business Continuity Plan）やICSは、一定の被害が生じること

を前提に、事後の対策・対応を立案する結果事象型の危機管理手法であるが、地震リスクマネジメントは、地震リスクを定量化し、事前防災の考え方を前提にハード対策（例えば、耐震化策、代替機能の確保等）、金融対策（地震保険、代替的リスク転嫁等）、さらにソフト対策（防災マニュアルの整備、防災訓練等）を含めた総合的な視点から、防災/減災対策をより効果的に実施するための枠組みである。この点から、地震リスクマネジメントは BCP や ICS を含めた防災の概念と言える。したがって、地震リスク評価を適切に行うことは、具体的な BCP の構築や効果的な ICS の実現につながる。

### 1.3 ガイドラインにおける地震リスクの定義

事業者の地震リスクは、人命喪失、財物損失、事業中断による逸失利益（事業所が稼動していれば得られた利益）、さらに出火/延焼や危険物漏洩による二次災害など、様々である。本ガイドラインでは、発災時における事業所の生産機能及び製品出荷機能に着目し、地震リスクとして、生産停止期間、あるいは製品出荷停止期間を評価する。

#### 【解説】

製造業を対象とした地震リスクのうち、財物損失額ならびに逸失利益は、事業所の規模や財務状況等、事業所固有の経済的事情に関わるもので、発災時の社会・経済活動に直接影響するものではない。そこで、図 1.3-1 に示すように、本ガイドラインでは、生産停止期間および製品出荷停止期間の評価方法を示す。

生産停止および製品出荷に関する復旧曲線や健全度曲線を評価する。復旧曲線（図 1.3-2）は、発災により生産や製品出荷が停止した後、復旧作業の進捗により、当初の生産や製品出荷状態に復旧するプロセスを示した曲線である。横軸は発災からの経過時間、縦軸は当初の生産量に対する比率、あるいは通常の製品出荷量を 1.0 に基準化した復旧率である。一方の健全度曲線（図 1.3-3）は、生産活動や製品出荷が健全に実施できる確率（以下、健全確率と呼ぶ）を示した曲線であり、復旧曲線と同様に、復旧作業の進捗により健全確率は上昇する。健全確率 1.0 は通常の生産や製品出荷状態を示す。

復旧曲線ならびに健全度曲線の評価方法については、「**2.7.2 復旧曲線の評価**」、「**2.7.3 健全度曲線の評価**」に示す。これら曲線を利用したリスクマネジメントの具体的な方法は「**3. 地震リスクマネジメント**」で、それぞれ解説する。

一方、臨海部コンビナート施設では、二次災害の誘因となる出火/延焼、危険物漏洩/拡散等を防止するため、製造装置を緊急停止（シャットダウン）させるとともに、貯蔵物を隔離する必要がある。本ガイドラインでは緊急停止基準（最適なトリガーレベル）の考え方や評価方法について「**3.6 緊急停止基準の検討**」で解説する。

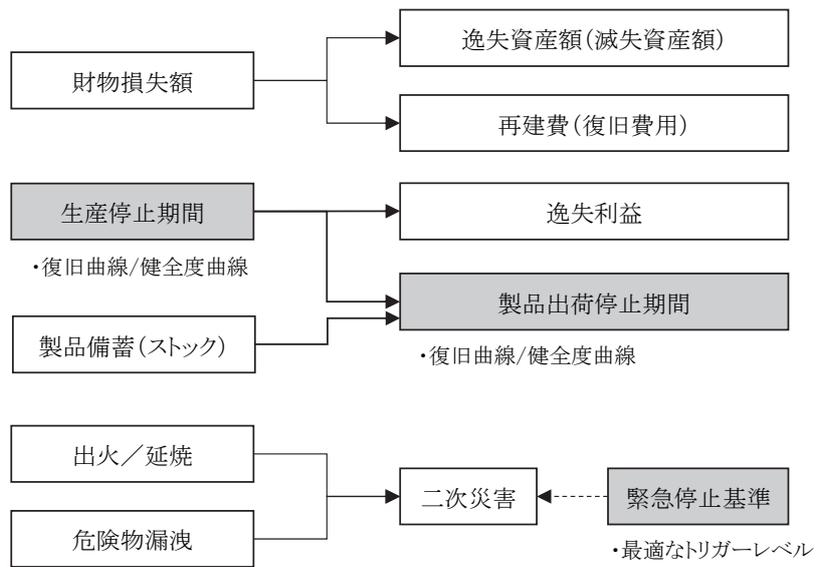


図 1.3-1 本ガイドラインで対象とするリスク  
(本ガイドラインの対象は、図中のハッチングした項目)

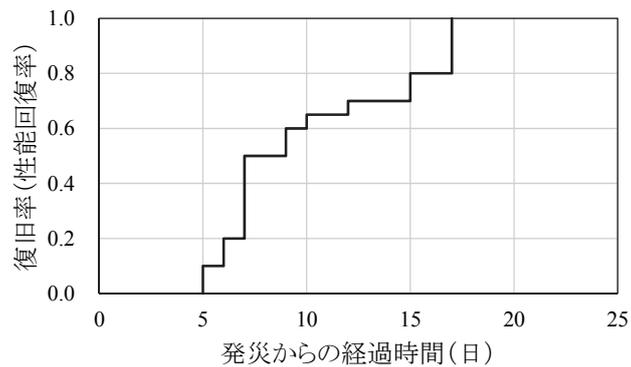


図 1.3-2 復旧曲線の例

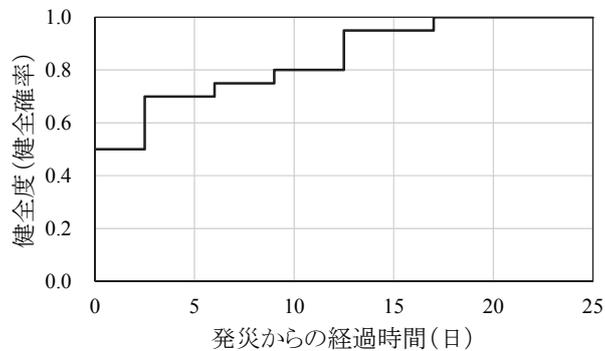


図 1.3-3 健全度曲線の例

#### 1.4 地震リスクマネジメントの目標と対象機能

地震リスクマネジメントでは、リスク管理の具体的な数値目標とリスク評価で対象とする機能（例えば製品製造、製品出荷等）、および評価範囲を明確にする。

##### 【解説】

地震リスクマネジメントでは、「生産停止期間を 30 日以内とする」、「発災から 3 日以内に製品出荷を行う」等の具体的な数値目標を設定する。事業者は、現状の地震リスク（生産停止期間、あるいは製品出荷停止期間等）と目標を比較することで、対策の必要性を関係者間で共有することができる。そして、目標を満たす効率的な対策の選定と実施により、地震リスクマネジメントは達成される。

一方、コンビナート施設の地震リスク評価には、工場全体の生産機能を対象とする場合と、工場の一部機能を対象とする場合がある。製品出荷機能に限定した場合でも、その機能に関わる諸装置やユーティリティは場内に広く分散しており、評価対象設備は広範囲に及ぶ。また、工場外部のライフライン（電力、工業用水等）や道路、鉄道等をどこまで評価範囲として含めるかを、明確に定める必要がある。

リスク管理の数値目標、リスク評価で対象とする機能や評価範囲の設定は、地震リスク評価の精度やリスクマネジメントの結果にも影響を与えることから、関係者間で事前に十分検討する必要がある。

#### 1.5 地震リスク評価の範囲とマネジメントの範囲

地震リスクマネジメントでは、事業者は自らの裁量によってリスク管理ができる範囲（主に事業所内の施設）と裁量の及ばない範囲（事業所外部のライフライン、自治体が所有する護岸等）を明確に分け、裁量の及ばない範囲の情報を収集することが必要である。

##### 【解説】

臨海部コンビナート施設は、塔槽類や加熱炉等の製造設備、架構・配管類等の場内移送設備、球形・円筒形タンク等の貯蔵設備、各種ユーティリティ、生産管理・品質管理施設、原料や製品荷役に関わる護岸や栈橋等の港湾構造物等から構成される。さらに事業所外部のライフライン（電力、工業用水等）や道路・鉄道等のアクセスも、事業所の生産機能に関わる。地震リスク評価の対象範囲は、事業所内部の施設のみならず外部施設を含めた評価が必要になる。しかしながら、事業者の裁量によってできる対策の範囲は、事業者が所有あるいは管理する施設に限られることから、外部の施設（例えば、電力やアクセス道路、自治体所有の護岸等）については、リスク評価の対象ではあるものの、リスクマネジメントの対象とはならない。

地震リスクマネジメントを実施するにあたり、事業者は自身の裁量の範囲と裁量の及ばない範囲を明確に分けるとともに、裁量の及ばない範囲の情報がどこまで入手できるかなどを、事前に調査/把握する必要がある。

## 1.6 地震リスク評価における配慮すべき点

地震リスク評価では、(1) 設計や耐震調査などで使われている解析技術を活用する、(2) 解析結果の誤差を明らかにする、(3) 既存の耐震診断結果を活用する、の3点に配慮する必要がある。

### 【解説】

#### (1) 既存の解析技術を利用する

地震リスク評価は、設計や耐震調査などで使われている解析技術を活用することが望ましい。これら解析技術は、様々な研究や実験、シミュレーション等を通じて検証あるいは高度化されており信頼度が高いこと、また、適用範囲が明確で、解析結果の誤差についてもある程度把握できること、などが理由である。また、普及している解析技術は、第三者への説明が容易なことも利点である。

#### (2) 解析手法の誤差を明らかにする

地震リスク評価では、解析結果の誤差を確率分布として捉え、その特性値（平均値や標準偏差等）や分布形状から、被害の発生確率や構造物の損傷確率を評価する。このため、地震リスク評価に使われる解析手法（例えば、距離減衰式による地震危険度評価、重複反射理論による地盤増幅評価、応答スペクトル法による構造物の耐力評価など）の適用範囲や誤差を明らかにする必要がある。本ガイドラインでは、地震リスク評価に使われる解析手法の誤差を統計的に分析した結果を「2.6.2 不確実性の設定」に取りまとめている。

#### (3) 既存の耐震診断結果や各種の耐震調査結果を活用する

製造設備や貯蔵施設等の耐震診断結果、または地震危険度や液状化危険度判定などの調査結果がある場合には、これらを地震リスク評価に反映する。理由は、診断結果や各種の調査結果が、地震リスクの評価結果（生産停止期間、製品出荷停止期間）にどのように影響するかが確認できること、既存の診断結果との整合性が図れ、地震対策の選定において事業所内での合意が取り易いこと、などである。

## 1.7 地震リスクマネジメントの実施体制

地震リスクマネジメントを円滑かつ効果的に行うため、社内においてリスクマネジメントの実施体制を整備する。

### 【解説】

地震リスク評価では様々な部署の横断的な協力が必要になる。したがって、地震リスク評価および地震リスクマネジメントを円滑に実施するために、事業所内において実施責任者を選任する。実施責任者は、各部署間で連携を図りつつ地震リスク情報を共有し、リスクマネジメントを円滑に遂行する。

## 2. 地震リスク評価

### 2.1 地震リスク評価の項目と流れ

地震リスク評価は、目標と評価範囲を設定した上で、施設の情報収集と分析、ハザード設定、地盤増幅特性と液状化危険度の評価、地震リスク評価のためのモデル作成、フラジリティカーブの評価、の各プロセスを経て行う。

#### 【解説】

地震リスク評価の項目とフローを図 2.1-1 に示す。「1.4 地震リスクマネジメントの目標と対象機能」「1.5 地震リスク評価の範囲とマネジメントの範囲」に示したように、目標と対象機能、対象とする空間的範囲を設定する。施設の情報を収集/整理し、施設の位置情報などから地震および津波による危険度を評価する。地盤増幅特性と液状化危険度を評価する。次に、地震リスク評価のためのモデルを作成し、被害要因毎の損傷確率を求めるためのフラジリティカーブを求める。復旧期間等の諸条件を設定し、復旧曲線、健全度曲線などを求めて地震リスクを評価する。

次節以降で、図 2.1-1 のフローの各項目について詳しく解説する。

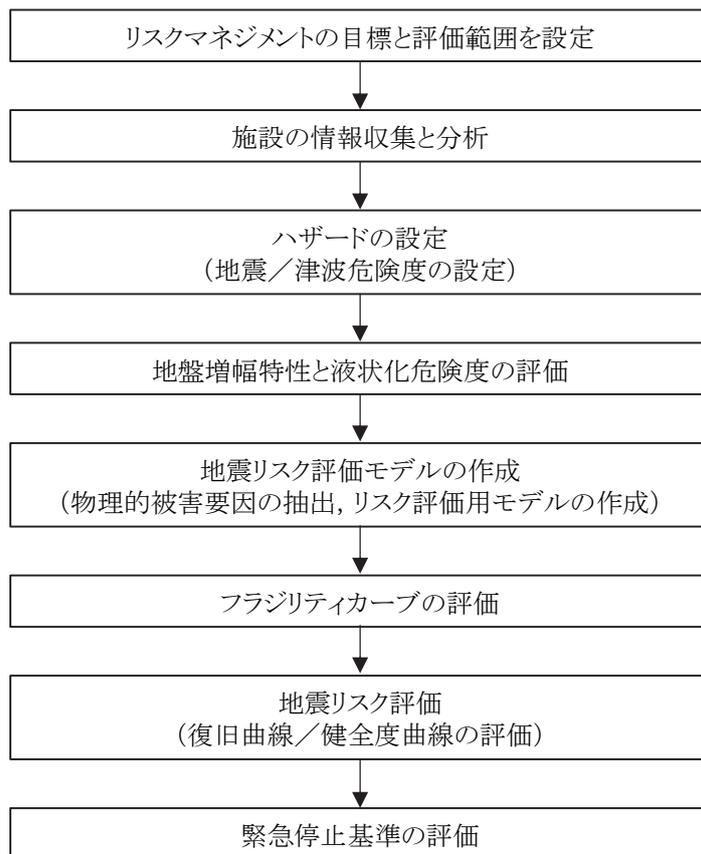


図 2.1-1 地震リスク評価のフロー

## 2.2 臨海部コンビナート施設の情報収集と分析

### 2.2.1 情報収集と分析

臨海部コンビナート施設に関連する情報収集を行う。情報は、設備の構成や配置情報（配置図）、各種構造物の設計図書、地盤情報、各種製品の製造工程を示した PFD（Process Flow Diagram）、出荷方法を記したフロー図、各種のリスト（主要な装置リスト、貯蔵設備リスト、ユーティリティリスト、出火危険装置リスト）、ならびに緊急停止システム、生産管理システム、入出荷管理システム、品質管理システム、消火システムなどである。

#### 【解説】

##### （1）各種構造物の設計図書

設計図書は、製造装置や貯蔵設備、配管架台や建屋等の耐震性能を評価するために用いる。耐震診断結果も収集する。

##### （2）地盤情報

地盤情報は、敷地の地盤増幅特性の評価、および液状化危険度の評価に用いる。収集する情報は、土質柱状図や土質試験結果、および液状化に関する調査報告書等である。

##### （3）各種製品の製造工程を示した PFD（Process Flow Diagram）、出荷方法のフロー図

製品種毎に、原材料の入荷方法、製造工程、および出荷方法を把握するための資料/情報であり、PFD、あるいは PFD を簡便に記した生産フロー図等がこれらに相当する。地震リスク評価のためのモデルを作成するために用いる。

##### （4）各種のリスト、システムに関連する情報

主要な装置リスト、貯蔵設備リストは、内容物、容量、建設年代をリスト化したものを収集する。ユーティリティリストは、製造工程で必要となるユーティリティを把握するために整理された資料である。出火危険装置リストは、倒壊した場合に出火する装置であり、呼称と所在箇所を整理する。ユーティリティリスト、および出火危険装置リストが整っていない場合は、ヒアリングを行う。

##### （5）システムに関連する情報

緊急停止システム、生産管理システム、入出荷管理システム、品質管理システムは、生産活動に不可欠な仕組みであり、また消火システムは派生的 2 次災害を抑止/抑制するための重要な仕組みである。これらは地震リスク評価のためのモデルに組み入れる必要があり、ダイアグラム、またはフロー図として整理する。

### 2.2.2 ウォークダウンの実施

施設の運営/管理者の下で、ウォークダウン（現地踏査）を実施する。同時に施設の運営/管理者から、地震リスク評価に必要な事項をヒアリングする。

#### 【解説】

ウォークダウン、ヒアリングにおける注意点を以下に示す。

##### （1）事前に収集した情報との整合性

設備の構成と配置情報（配置図）、各種構造物の設計図書（耐震診断書を含む）と、現場との整合性を確認する。

#### （２）老朽化、劣化等の評価

各種構造物について、耐震性能に影響を与えるような著しい老朽化や劣化の有無を目視により確認する。著しい老朽化や劣化が認められる場合は、適宜劣化診断の調査を行う。また、耐震性能評価において考慮する。

#### （３）被害の従属や相互干渉の確認

架台上に設置されている装置は、装置そのものの転倒や滑動被害に加え、架台が倒壊した際にも被害を受ける。このような被害の従属関係を確認する。また、製造装置の転倒や脱落、滑動などの被害が、他の設備を破損させる可能性があるか否かを確認する。

#### （４）二次被害の確認

津波による漂流物の衝突、液状化による地盤変状、出火による延焼・爆発、可燃性溶液やガス等の漏洩に起因する二次被害の可能性を確認する。

#### （５）ヒアリング事項

ウォークダウンでは、設計図書の調査や目視だけでは得られない情報をヒアリングにより収集する。ヒアリング事項は、装置やユーティリティの代替性、緊急時の対応、緊急時の点検項目や点検に必要な時間等である。

## 2.3 ハザードの設定

### 2.3.1 ハザードの基本的考え方

ハザードは、危険事象の発生確率（頻度でもよい）と危険事象の大きさを表す。地震リスク評価では、ハザードとして地震危険度、および津波危険度を考慮する。

#### 【解説】

自然災害に関するハザードは、立地点における地震、津波、豪雨、高潮、火山の噴火等の発生確率（頻度でもよい）と地震、津波等が発生した際の外力の大きさを示したもので、外力が大きく発生確率が高いほど、ハザードは大きいと解釈される。

地震危険度は、地震の発生確率と当該地点で発生する地震動の大きさを表し、津波危険度は、津波の発生確率と当該地点で発生する津波高さや浸水高さを表す。

### 2.3.2 地震危険度の設定

地震リスク評価における地震危険度の設定は、広域に散在する施設の同時被災によるリスクを評価できる複数震源モデル（マルチイベントモデル）を用いる。

#### 【解説】

地震危険度（地震ハザード）は、対象とする地点で、将来発生する可能性のある地震動強さ（加速度、速度等）と、それが発生する確率を表したものである。したがって、地震の発生場所及び規模を確率論的に予測するとともに、地震が発生した場合に、対象地点で

生じる地震動強さを評価する。地震動強さは、距離減衰式による方法、Green 関数を用いた強震動予測などの方法があるが、地震リスク評価では距離減衰式による方法が一般に用いられる。距離減衰式による方法が用いられる理由は、「付録－6 地震リスク評価におけるサンプルアプローチと応答スペクトル法」で述べる。

地震ハザードに関する情報としては、2005 年に地震動予測地図<sup>1)</sup>が公表され、防災科学技術研究所の Web サイト<sup>2)</sup>にて、日本全国の各地点で地震ハザード曲線<sup>3)</sup> (図 2.3-2) が取得できる。しかしながら、公開されている地震ハザード曲線は、特定の地点における地震動強さとその発生確率を表記したもので、地震動を誘発する地震源 (シナリオ地震) を特定することができない。このため、広域に散在する施設の同時被災によるリスクを評価できない。

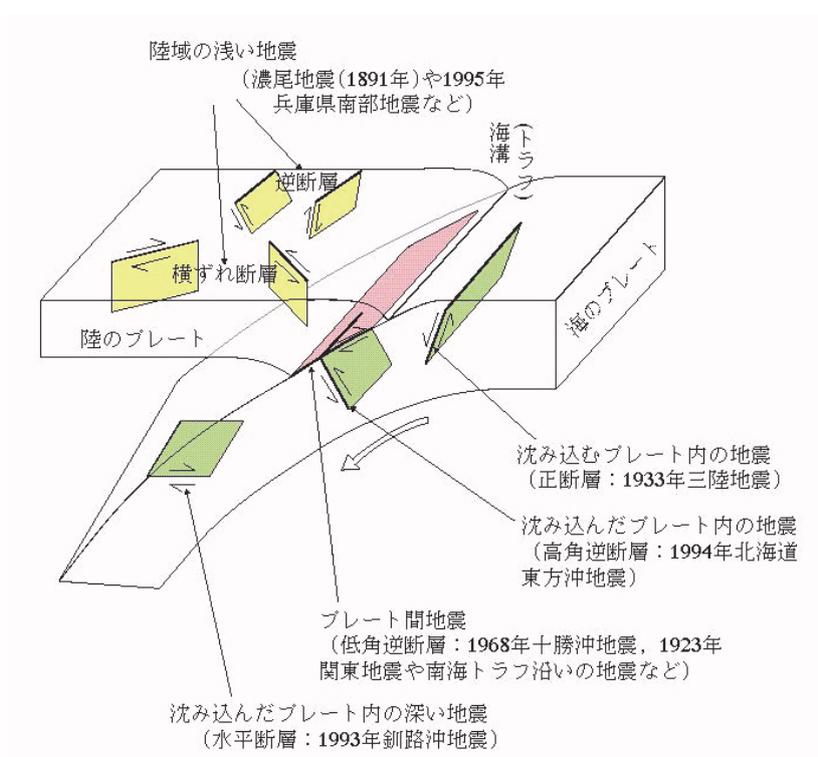


図 2.3-1 地震のタイプ<sup>4)</sup>

そこで、本ガイドラインでは、シナリオ地震をベースとした複数震源モデル (マルチイベントモデル) による方法を用いる。マルチイベントモデルで考慮するシナリオ地震は、図 2.3-1 に示す地震のタイプの違いを参考にし、地震危険度評価用の地震モデルの違いも考慮しながら、以下の 4 種類に分類する。

- ① 地表面に断層として表れない中規模な地殻内地震
- ② 活断層による大規模な地殻内地震
- ③ 活断層と関連しない大規模な地殻内地震
- ④ 大規模な海溝付近の地震

このうち、①の地表面に断層が表れない中規模な地殻内地震は、位置や規模を特定できない地震である。このような地震は、対象地点の直下のごく浅いところで発生する場合があります、規模が比較的小さくても被害を及ぼす可能性があるため、M（マグニチュード）5.0程度以上、M7.0程度以下の中規模な地震も対象とする。①の地震を一般的に背景地震と呼び、地震の活動度が一定と見做せる地震域を設定し、同域内で発生した過去の地震の平均的な震源深さを断層中心として、地震規模に応じた断層長さを有する走向ランダムな鉛直断層を想定することができる<sup>5)</sup>等。

地震規模がある程度大きくなると、地震断層の痕跡を残すと考えられることから、M7.0程度を超える大規模な地震は、②の活断層による大規模な地震として取り扱う。ただし、2000年鳥取県西部地震（M7.3）や2008年岩手・宮城内陸地震（M7.2）のように、M7.0程度でありながら、陸域で活断層が知られていないところで発生する大規模な地震もあるので、それを③の活断層と関連しない大規模な地殻内地震として取り扱う。以上の①～③は、いずれも地殻内地震に分類される。

一方、④の大規模な海溝付近の地震には、プレート境界の沈み込みによって発生するプレート間地震と、プレート内部で発生するプレート内地震がある。また、プレート境界付近でも中規模（M5.0～M7.0）な地震が頻繁に発生しているが、いずれも陸域から離れたところで発生し、建物や施設に被害を与える可能性は低いので、海溝付近で発生する地震としては大規模なもののみを対象とする。

一方、マルチイベントモデルによる特定の地点での地震危険度は、図2.3-3に示すイベントハザード曲線を用いて記述する。イベントハザード曲線は、シナリオ地震毎に対象地点での地震動強さを求め、地震動の大きい順から、シナリオ地震の年発生確率を累積したものをプロットすることで求められる。縦軸は累積確率、横軸は地震動の大きさである。また、観測地点での地震動強さの評価には、誤差が生じることが知られているが、イベントハザード曲線では、地震動評価の誤差を考慮せず、距離減衰式等から得られる平均値をプロットしている。

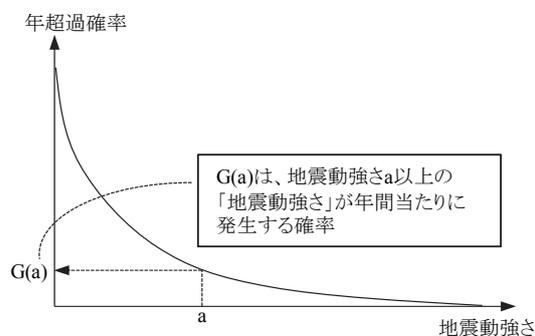


図 2.3-2 地震ハザード曲線

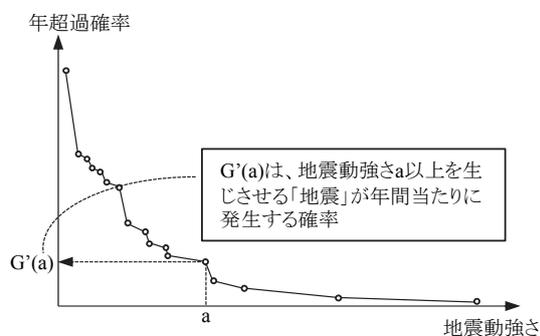


図 2.3-3 マルチイベントモデルを用いた  
イベントハザード曲線

なお、図 2.3-4 に示すように、地震動強さの評価に関する誤差の確率分布を求め、この超過確率にシナリオ地震の発生確率を乗じ、シナリオ地震毎に積分すると図 2.3-2 に示す地震ハザード曲線を求めることができる。このように得られた地震ハザード曲線は、マルチイベントモデルを構成するシナリオ地震に漏れがなければ、地震ハザード曲線と一致する。

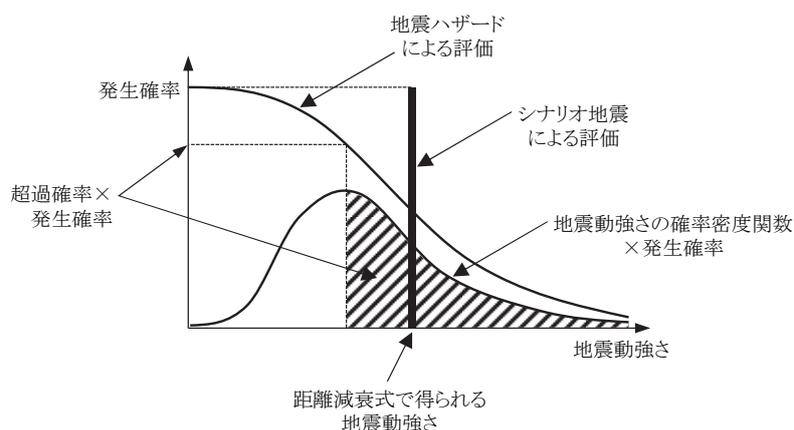


図 2.3-4 地震ハザード曲線とイベントハザード曲線の関係<sup>6)</sup>

#### 参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 (2005) : 「全国を概観した地震動予測地図」報告書, 平成 17 年 3 月 23 日, [http://jishin.go.jp/main/chousa/05mar\\_yosokuchizu/index.htm](http://jishin.go.jp/main/chousa/05mar_yosokuchizu/index.htm)
- 2) 防災科学技術研究所: J-SHIS 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 3) Cornell, C. Allin: Engineering seismic risk analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1698.
- 4) 総理府地震地質調査研究推進本部地震調査委員会編: 日本の地震活動—被害地震から見た地域別の特徴—, 追補版, 1999.
- 5) 宇賀田健: シナリオ地震による日本全国の地震危険度評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 541 号, pp.95-104, 2001.
- 6) 中村孝明, 宇賀田健: 地震リスクマネジメント, 技報堂出版, P.290, 2009.

### 2.3.3 津波危険度の設定

津波危険度は、マルチイベントモデルで設定されているシナリオ地震の中で、特に津波が発生する地震を抽出し、その地震による当該地点（海岸域）での津波高さや発生確率で表す。

#### 【解説】

津波は海域で発生する横ずれ断層以外の地震によって発生し、また、マグニチュード 7.0 以下の地震では被害を伴う大津波は発生しないと考えられている。そこで、マルチイベン

トモデルのシナリオ地震の中から、津波被害を生じさせる地震を選別し、その地震による海岸域での津波高さを推計する。そして、津波高さとその地震の発生確率から、津波危険度を評価する。

一般に、海岸域での津波高さの予測は、津波距離減衰式による方法、非線形長波理論による平面2次元解析、3次元VOF (Volume of Fluid) 法などがある。VOF法は、大気との境界(自由水面)を有する複雑な流れを再現する方法として利用され、構造物周辺に回り込む流れを精緻に分析したり、建物への津波流体力を計算するなど、流場の3次元効果を細かく再現する場合に有効であるが、計算時間が長いため、リスク評価には適していない。したがって、海岸域での津波高さの予測には、津波距離減衰式による方法、または非線形長波理論による平面2次元解析が用いられる。

陸域での津波の浸水範囲や浸水高さ評価する方法としては、レベル湛水法、非線形長波理論に基づいた平面2次元解析などが用いられる。レベル湛水法は、来襲する津波高さを海岸域で設定し、その水位がそのまま静的に、陸域に浸水するものとして浸水範囲を計算する方法である。遡上の摩擦抵抗は考慮されず、陸域の標高のみによって決定するため、浸水範囲はより高い地域まで広がる評価となる。ただし、谷間などの狭小域への遡上効果は考慮出来ない。

津波距離減衰式による海岸域での津波高さの予測には、以下の津波距離減衰式<sup>1)</sup>を用いることができる。

$$\log H_t = M_w - \log \Delta - 5.55 \quad (2.3-1)$$

ここに、 $H_t$ は津波高さ(全振幅)、 $M_w$ は地震のモーメントマグニチュード、 $\Delta$ は津波の伝搬距離である。なお、 $\Delta$ が(2.3-3)式に示す距離 $r_0$ 以下の場合、 $H_t$ は伝搬距離によらず、以下の式で算出される。

$$\log H_t = 0.5M_w - 3.30 \quad (2.3-2)$$

ここで、 $r_0$ は以下の式より求める。

$$\log r_0 = 0.5M_w - 2.25 \quad (2.3-3)$$

文献1)によれば、津波距離減衰式のばらつきは、常用対数の標準偏差で0.19(自然対数の標準偏差に換算すると約0.44)とされている。なお、(2.3-1)、(2.3-2)式は、太平洋側(外

洋) の津波を想定したものである。このため、例えば、内海の東京湾岸域の沿岸における想定津波高さの評価には誤差が大きい。そこで、過去の地震による津波高さの観測値や非線形長波理論によるシミュレーションによる推定値を用い、津波距離減衰式による津波高さを補正する必要がある。

津波被害の発生確率の評価フローを図 2.3-5 に示す。同図は津波距離減衰式およびレベル湛水法を用いたフローである。マルチイベントモデルで設定されているシナリオ地震の中で、津波が発生する地震を選別し、対象地点から震源までの津波伝搬距離を求め、対象地点での津波高さを推計する。図 2.3-6 に示すように、対象地点での防潮堤や護岸等の防御物の高さを調査し、これと津波高さの確率分布を比較することで、津波が越波し陸域に浸水する確率を求める。この確率が津波被害の発生確率となる。なお、津波高さは対数正規分布に従うものとし、ばらつきは文献 1) にもとづき、対数標準偏差 0.44 を設定する。対象施設敷地の標高から、越波した津波の浸水範囲を求める。津波浸水の範囲や水深(浸水高さ)から、適宜、津波被害の状況を想定する。

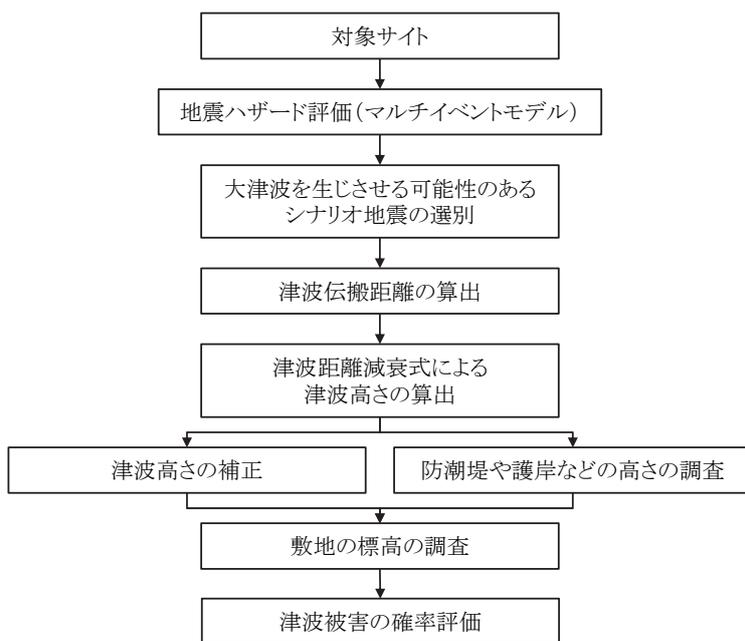


図 2.3-5 津波被害の発生確率の評価フロー

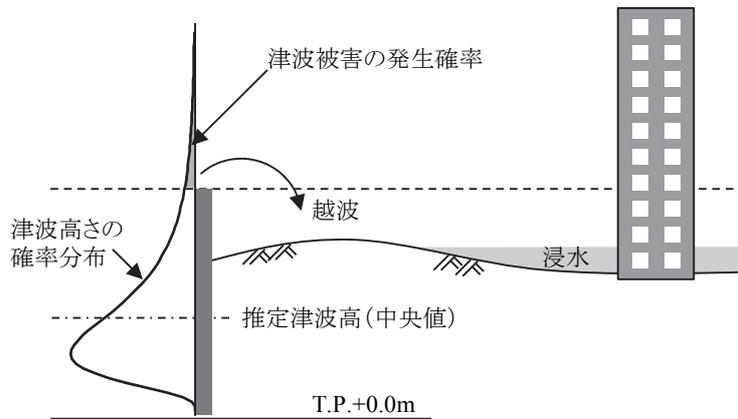


図 2.3-6 津波被害の発生確率の評価の説明図

参考文献

- 1) 阿部勝征: 地震と津波マグニチュードに基づく津波高さの予測, 地震研究所彙報, 第 64 冊第 1 号, pp.51-69, 1989.

## 2.4 地盤増幅特性と液状化危険度の評価

### 2.4.1 地盤増幅特性の評価

構造物の地震時の応答は、表層地盤の影響を強く受けることから、敷地における地盤の動的応答特性の評価を行う。

#### 【解説】

構造物の応答は、表層地盤の影響を強く受けるため、表層地盤の動的応答特性を評価する。表層地盤の動的応答特性は伝達関数（周波数応答関数）、あるいは応答スペクトル比により表現する。臨海部コンビナート施設は様々な周期特性を持った構造物が多数混在していることから、それぞれの地震応答を一定の精度を確保して、且つ簡便に評価する必要がある。そこで、構造物の応答の評価は、応答スペクトルをベースとした方法を使うことを前提に、表層地盤の動的応答特性は応答スペクトル比で評価する。

図 2.4-1 は表層地盤の応答スペクトル比の評価フローを示す。まず、周期特性や継続時間、最大加速度の異なる様々な加速度時刻歴波形を用意する。少なくとも 20 波以上は必要である。一方で、ターゲットとなるシナリオ地震（地震リスク評価用のシナリオ地震）が予め設定されている場合は、シナリオ地震固有の地震波形を利用する。重複反射理論や非線形逐次時刻歴解析などの手法を使い、地表面あるいは構造物の基礎底面での加速度時刻歴波形を計算する。工学的解放基盤面における加速度時刻歴波形の応答スペクトル  $S_a^B(T)$  と、地表面あるいは構造物の基礎底面での応答スペクトル  $S_a(T)$  を求め、これらの比を計算する。これが応答スペクトル比  $R_a(T)$  である。求められた  $R_a(T)$  の平均を、当該地盤の応答スペクトル比としてリスク評価に用いる。

ここで、地盤は地震動が大きくなると剛性の低下と減衰の増加が起こる。つまり入力地

震動に対して非線形の挙動を示す。このため、地震波の加速度レベルに応じて応答スペクトル比は変化する。大きい地震動が作用した際、地震リスクを過大評価すると判断される場合、またはリスク評価の精度を高める場合には、加速度レベルに応じた複数のスペクトル比を用意する必要がある。図 2.4-2 に、地震動の大きさに対応した加速度応答スペクトル比を例示している。なお、地盤の非線形挙動を考慮した構造物の損傷確率については、「付録－4 地盤の非線形性を考慮した損傷確率の評価」で述べる。

一方、非線形逐次時刻歴解析を用いるには、当該敷地の土質区分やN値、PS検層や密度試験、さらに三軸捩じり試験等の情報をもとに地盤モデルを作成する必要がある。しかしながら、三軸捩じり試験が実施されることは少ない。非線形逐次時刻歴解析は望ましいが、この解析を実施するのに必要な情報は限られることを前提に、評価手法を選定する必要がある。

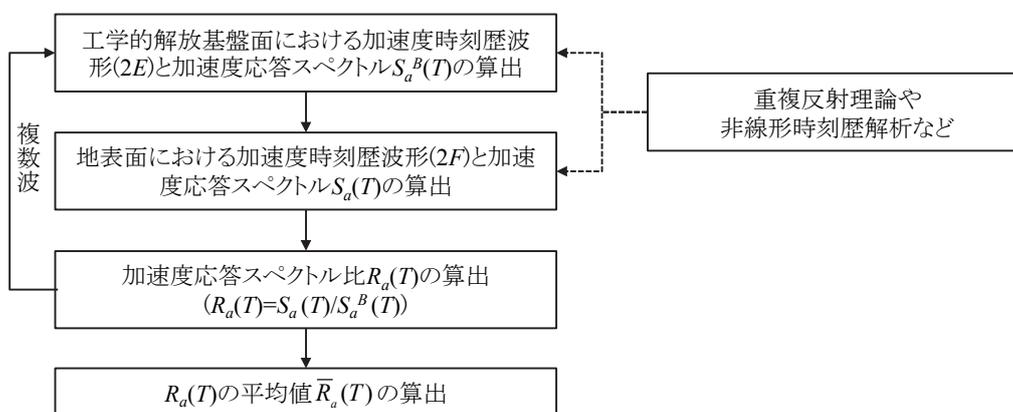


図 2.4-1 表層地盤の加速度応答スペクトル比の評価フロー

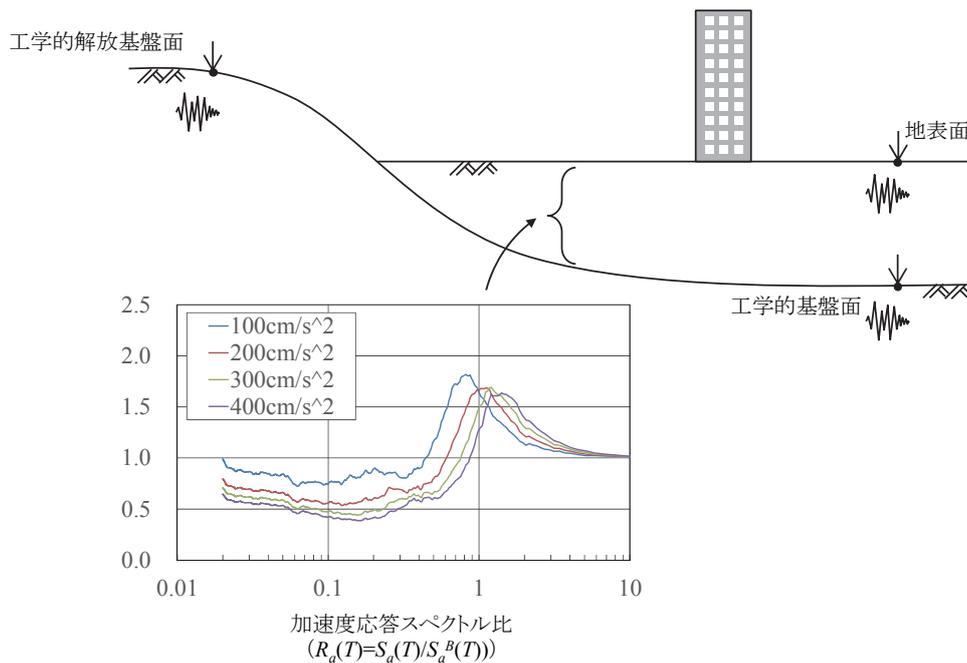


図 2.4-2 加速度レベルに応じた複数の加速度応答スペクトル比

### 2.4.2 液状化危険度の評価

地震リスク評価では、液状化による地盤変状が物理的被害要因の一つとなるため、液状化の起こりやすさ（液状化危険度）を評価する。さらに地盤変状による被害の様態を予測する。

#### 【解説】

地盤の液状化危険度の判定方法には、①地形地質や液状化履歴を基にした概略の判定法、②一般の土質調査、試験結果をもとにした簡易な判定方法、③室内液状化試験や地震応答解析を行う詳細な判定法、④模型振動台実験や原位置液状化試験を行う方法がある<sup>1)</sup>。このうち、②、③は構造物の設計時にもよく用いられている。例えば、②に関する代表的な手法としては、 $F_L$  値法がある。 $F_L$  値法では、地盤内のある深さの液状化強度比と、地震時に作用する繰り返しせん断応力比の比をとって液状化に対する安全率  $F_L$  とし、 $F_L \leq 1.0$  であれば、液状化の可能性があると判定される。 $F_L$  値は任意の深度における液状化の可能性を示す値であるが、その地点の地盤の液状化の度合を示す指標となる  $P_L$  値は、 $F_L$  値から求められる。

③の方法には、室内液状化試験により液状化強度を求め、地震応答解析を行って地盤内に発生する繰り返しせん断応力を評価して液状化判定を行う全応力解析と、地震時の土中の過剰間隙水圧の上昇、消散による有効応力の変化に応じて土の応力-ひずみ関係を時々刻々変化させる有効応力解析がある。地震リスク評価では、②、③のような判定方法を適宜選択して行い（もしくは公開されている判定結果を参照し）、液状化危険度を把握する。

液状化危険度が高くても、液状化の程度や構造物の基礎形式によっては被害が発生しな

いか、あるいは軽微の場合もある。このため、液状化による地盤や構造物の被害の発生を判断するには、液状化時の基礎の沈下量や杭基礎等の耐震性能を評価する必要がある。また、臨海部コンビナート施設の場合、入出荷機能に与える影響として、岸壁/護岸の変状、あるいは栈橋の変状による機能低下が大きい。これらは液状化による影響や慣性力による変形が大きいことが理由と考えられるため、液状化時の岸壁/護岸、栈橋の耐震性能を評価することも重要である。

参考文献

- 1) 鹿島建設 土木設計本部: 新・土木設計の要点⑩ 耐震設計/性能設計 鹿島建設 土木設計本部編, 鹿島出版会, P.197, 2003.

2.5 地震リスク評価モデルの作成

2.5.1 被害要因の抽出と機能復旧期間

地震リスク評価のため、収集した情報やウォークダウン、施設の運営/管理者へのヒアリングにもとづき被害要因を抽出する。併せて機能の復旧期間を調査する。

【解説】

物理的被害要因は、揺れによる震動被害、液状化被害、津波被害、および火災や危険物漏洩等の二次被害に類型できる。液状化被害ならびに津波被害は、標高や地盤状況などから、被害が発生しないことが自明な場合はこれを省く。二次被害に関しても、明らかに可燃物や着火源がない場合は、火災被害を省くことができる。また、被害要因や被害モードに対応した機能、あるいは設備の復旧期間を、ヒアリングや復旧作業に要する時間等から調査する。その際、必ずしも完全な修復に拘るものではなく、応急復旧等により機能が回復する期間を優先的に考える。表 2.5-1 に、被害要因と復旧期間の例を示す。

表 2.5-1 被害要因と復旧期間の例

設備	被害モード	被害状況	復旧期間	設備	被害モード	被害状況	復旧期間
塔槽類	基礎部の被害	基礎ボルトの破断	30日	球形貯槽	基礎部の被害	基礎ボルトの破断	30日
	胴板の被害	胴板の座屈	60日		ブレースの被害	ブレースの破断	60日
架構	中破	配管の変形	10日	回転機(ポンプ, モーター類)	基礎部の被害	基礎ボルトの破断	15日
	大破	配管の破断	20日		ケーシングの被害	ケーシングの破損	30日

### 2.5.2 ユニットの分類

設備の構成や配置図、各種製品の製造工程を示した PFD などの情報に加え、ウォークダウン、ヒアリングにより収集した情報を分析し、製造設備や貯蔵設備の空間的離間や機能分類、および地盤増幅特性や液状化危険度等をもとに区画化された範囲を、地震リスク評価のためのユニットとして分割する。

#### 【解説】

設備の構成や配置図、各種製品の製造工程を示した PFD、入出荷方法を記したフロー図、各種のリスト（主要な装置リスト、貯蔵設備リスト、ユーティリティリスト、出火危険装置リスト）、ならびに緊急停止システム、生産管理システム、入出荷管理システム、品質管理システム、消火システムなどの情報に加え、ウォークダウン、ヒアリングにより収集した情報の分析結果にもとづき、地震リスクの評価単位として、施設の離間、機能面で区画化された範囲、製造装置の被害の従属関係を考慮し、ユニットとして分割する（図 2.5-1 を参照）。また、ユニットは類似した地盤増幅特性や液状化危険度であることが望ましい。

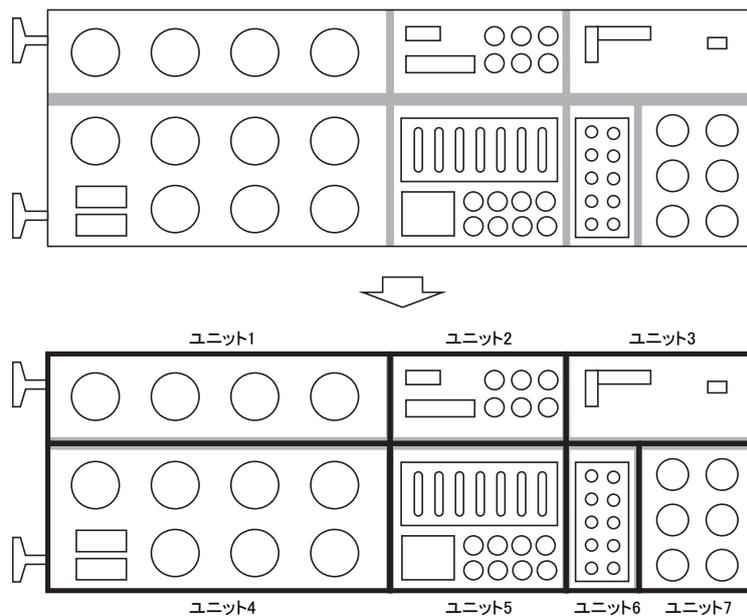


図 2.5-1 ユニットの分割の例

### 2.5.3 コンポーネントの分類

ユニットを構成する製造設備や貯蔵設備、各種配管類を抽出する。なお、抽出された設備や配管類を、本ガイドラインではコンポーネントと呼ぶ。

#### 【解説】

ユニットは種々の製造設備や貯蔵設備で構成されており、それらが地震で損傷することで、ユニットとしての機能は停止する。ユニットを構成する製造設備や貯蔵設備をコンポーネントと呼び、これを抽出する。注意点として、ユニット内のコンポーネントは、図 2.5-2

に示すように直列に構成されていると仮定し、どれか一つでも損傷した場合はユニットが機能しなくなると考える。つまり、同一のユニット内のコンポーネントは、機能面で従属していると考ええる。

ユニットを構成する製造設備や構造物は相当数に及ぶ。そこで、構造的に類似、建設年代が同時期など、耐震性能に差異はないと判断される構造物群については、一つの構造物として扱うことができる。また、同じ架台上に設置されている設備など、被害の発生に著しい従属が認められる場合にも、それらを一つの構造物として扱う。

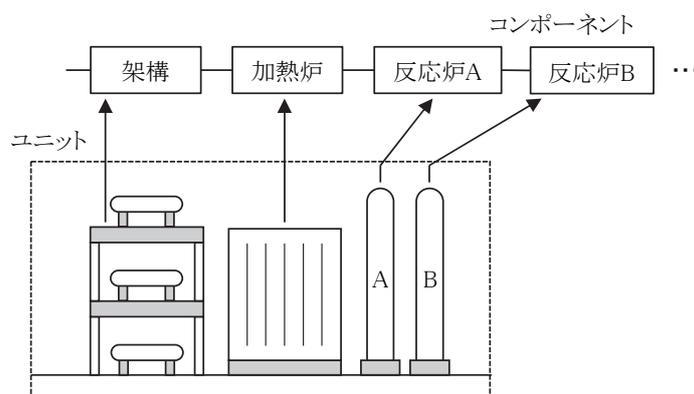


図 2.5-2 ユニットの構成するコンポーネントの例

#### 2.5.4 イベントツリー/フォールトツリーの活用

被害の進展や連鎖的な発生、組合せ等を評価するためイベントツリーを用いる。一方、様々な事象の組合せによって生じる故障や機能不全の確率を求めるために、フォールトツリーを用いる。

##### 【解説】

イベントツリー（事象樹木）は、被害の進展や連鎖的な発生、組合せなどを分析/評価するのに適した方法である。基本的には、様々な被害や被害モードの組合せ事象の確率と帰結を評価する方法として利用するが、被害の関連性を視覚的に把握できることから、第三者への説明にも役立つ。ユニットやコンポーネントの被害形態毎の確率や機能停止期間などを評価する際に利用する。

一方、フォールトツリー（故障樹木）は、様々な事象の組合せによって生じる故障や機能不全の確率を求めるのに効果的である。例えば、消火設備、生産管理システムは、感知、処理、駆動、移送、貯槽などの部位あるいはシステムで構成されている。地震では様々な被害が同時に発生するため、リダンダンシー（redundancy）を含めたシステム構成をフォールトツリーでモデル化し、故障や機能不全の確率を評価する。

図 2.5-3 は、2つの塔槽類が同一の架台上に乗った構造物を対象としたイベントツリーの例である。被害要因としては、地盤被害、架構被害、A塔被害、B塔被害の4つを考えている。

地盤被害は液状化の発生とし、無被害を含め 2 モード、架構被害は軽微、倒壊、無被害を含め 3 モード、塔槽類は倒壊の発生と無被害で 2 モードとする。それぞれの被害要因は排反事象の集合としてすべてをつくすと、被害形態は  $2 \times 3 \times 2 \times 2 = 24$  となる。ただし、液状化被害や架構の倒壊が発生すると全損になるため、図 2.5-3 に示すように末端の分岐数は 10、つまり被害形態は 10 に集約できる。一方、図 2.5-4 はイベントツリーによる復旧期間の期待値の計算例で、各分岐には各被害モードの発生確率、また ( ) に各被害モードによる復旧期間を示す。被害形態の発生確率は、各被害モードの発生確率の積、復旧期間は各被害モードの復旧期間の最大値をとり、復旧期間の期待値は各被害形態の発生確率とその復旧期間の積の総和で求められる。

図 2.5-5 は消火機能の機能喪失をフォールトツリーで事象展開した例である。頂上事象である消火機能停止は、送水管の損傷、ポンプ機能の停止、取水施設の機能停止の 3 事象に分解でき、それぞれの和事象として表現される。また、ポンプ機能は、ディーゼルポンプとモーターポンプの稼働の可否に分解でき、モーターポンプはさらに買電と自家発電の送電停止に分解できる。それぞれの積事象によってポンプ機能は表現される。求めたい頂上事象の確率は、フォールトツリーを使わなくとも容易に計算できるが、消火システムをフォールトツリーで表現することでシステムのリダンダンシーを視覚的に把握でき、第三者への説明や耐震対策の選定に役立つ。また、各基本事象（楕円形で示された事象）の発生確率は、脆弱性カーブから得ることができ、この場合、消火機能停止確率は地震動を条件とした一価の増加関数として求められる。

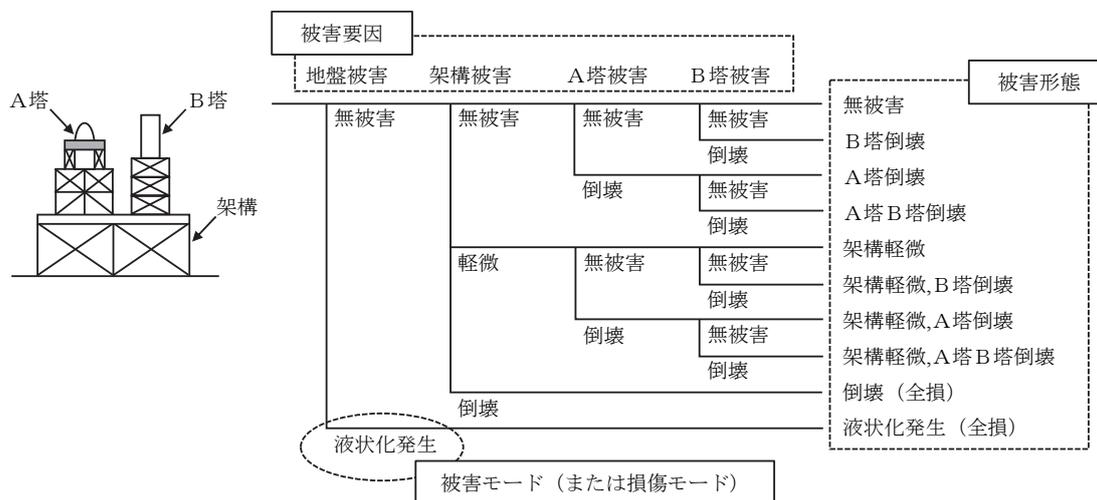


図 2.5-3 イベントツリーの例<sup>1)</sup>

地盤被害	架構被害	A塔被害	B塔被害	発生確率 P	復旧期間 T(日)	P × T
0.95(0)	0.70(0)	0.80(0)	0.85(0)	0.452	0	0.00
			0.15(60)	0.080	60	4.80
		0.20(30)	0.85(0)	0.113	30	3.39
			0.15(60)	0.020	60	1.20
	0.20(10)	0.80(0)	0.85(0)	0.129	10	1.29
			0.15(60)	0.023	60	1.38
	0.20(30)	0.20(30)	0.85(0)	0.032	30	0.96
			0.15(60)	0.006	60	0.36
	0.10(180)			0.095	180	17.10
	0.05(180)			0.050	180	9.00
						Σ 39.48

↑ 復旧期間(日) 損傷確率

↑ 各被害モードの発生確率の積

↑ 各被害モードの復旧期間の最大値(日)

↑ 復旧期間の期待値(日)

図 2.5-4 イベントツリーによる復旧期間の期待値の計算<sup>1)</sup>

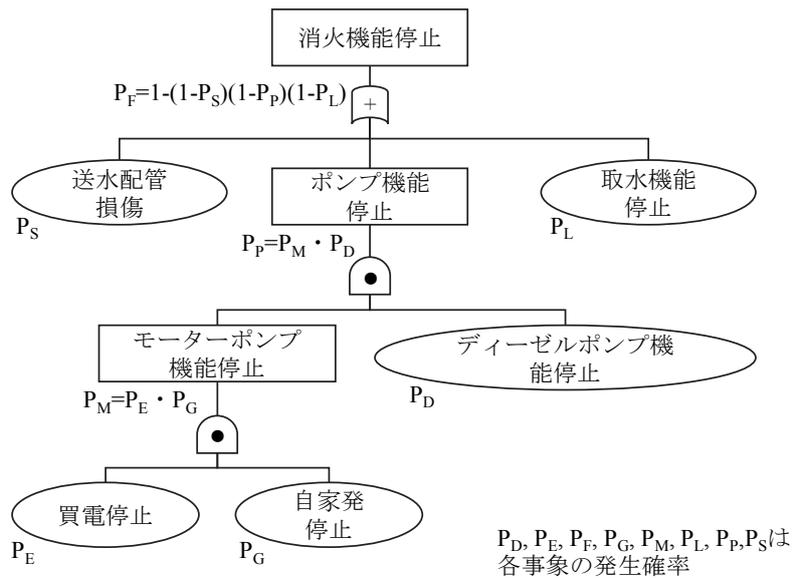


図 2.5-5 消火機能に関するフォールトツリーの例<sup>1)</sup>

参考文献

- 1) 中村孝明, 宇賀田健: 地震リスクマネジメント, 技報堂出版, P.290, 2009.

2.5.5 システムモデルの作成

事業所の地震リスクを評価するためのシステムモデルを作成する。システムモデルの構成は、直列、並列、およびそれらの混合型とし、要素は分割したユニットを基本とする。

## 【解説】

臨海部コンビナート施設の生産活動は、入出荷設備、製造設備、建屋、ユーティリティ、生産管理、品質管理など、様々な設備や機能が有機的な連関性をもって行われている。システムモデルは、生産に係る全ての設備や機能を対象とし、その要素は「2.5.2 ユニットの分類」で説明したユニットである。システムモデルは、要素を直列、並列に連結して構成される。

システムモデルの作成にあたっては、①入荷から出荷までの工程を上流から下流へ、ユニットを構成する、②必要なユーティリティ（電力、各種ガス、蒸気、工業用水、純水など）を要素として適所に組み入れる、③生産管理、品質管理を要素として適所に組み入れる、④各要素は、基本的にはユニットとするが、設備単体で一つの機能を有するコンポーネント（例えば、フレアースタック、製品圧送用ポンプなど）については、ユニットとしてシステムモデルの要素とする。

システムモデルの例を図 2.5-6 に示す。

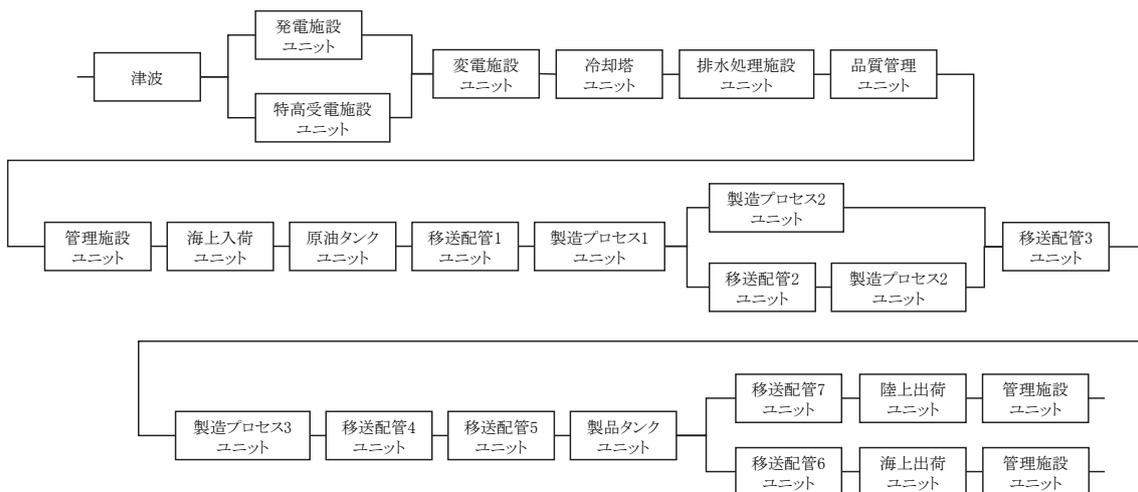


図 2.5-6 石油精製施設のシステムモデルの例

津波浸水や大規模な液状化などでは、浸水範囲や液状化範囲に位置する構造物は同時に機能を失う。津波浸水や大規模な液状化被害が広範囲でかつ著しいと判断される場合は、生産機能の喪失要因として、システムモデルの要素に組入れる。

## 2.6 フラジリティカーブの評価

### 2.6.1 フラジリティカーブの評価

製造設備や貯蔵設備、各種配管類の損傷確率を評価する。損傷確率はフラジリティカーブを求め、読み取る。

【解説】

フラジリティカーブは、地震動の大きさと損傷確率の関係を示す関数で、被害モード毎（例えば、大破、中破、軽微）に求める。フラジリティカーブの例を図 2.6-1 に示す。図に示した大破、中破、軽微の各フラジリティカーブは、それぞれ構造物に作用する地震動および耐力の中央値と対数標準偏差から次式により求められる。次式は対数正規分布の累積確率関数（非超過確率関数）である。

$$F_X(r_m) = \int_0^{r_m} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_X x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \ln c_m}{\zeta_Z}\right)^2\right\} dx \quad (2.6-1)$$

$$\text{但し、} \zeta_Z^2 = \zeta_C^2 + \zeta_R^2$$

ここに、 $F_X(r_m)$ は、作用地震動の中央値  $r_m$  を変数とした損傷確率（非超過確率）、 $c_m$  は耐力の中央値、 $\zeta_R$ 、 $\zeta_C$  は作用地震動と耐力の対数標準偏差、 $\zeta_Z$  は作用地震動と耐力のばらつきを組み合わせた対数標準偏差で、複合偏差と呼ぶ。なお、作用地震動の中央値、及び耐力の中央値は、固有の周期特性を持つ構造物では加速度や速度等、多層の構造物であれば層間変位、剛体構造物は最大加速度などを使う。構造物によって被害の発生を判定する指標が異なるのが理由である。なお、「2.6.3 耐震性能の評価」では、耐力の中央値  $c_m$  を評価する方法を概説する。

図 2.6-1 より、中破が発生する確率は、中破の損傷確率から大破の損傷確率を差し引いたもの、軽微が発生する確率は、軽微の損傷確率から中破の損傷確率を差し引いたもの、無被害の発生確率は、確率 1.0 から軽微以上の損傷確率を差し引いたものになる。また、無被害を含めた被害モードの発生確率の総和は 1.0 となる。

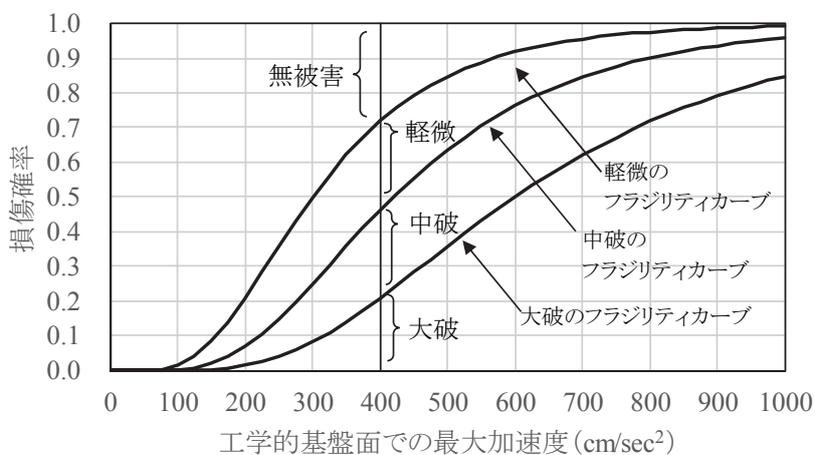


図 2.6-1 フラジリティカーブの例

## 2.6.2 不確実性の設定

フラジリティカーブの評価に必要な対数標準偏差は、地震危険度の設定に関するもの、サイトの地震動評価に関するもの、地盤増幅特性の評価に関するもの、地震動強さによる建物の応答評価に関するもの、建物の耐力のばらつき、モデル化の不確定性の6つに分けられ、これらの複合偏差として表される。

### 【解説】

#### (1) 複合偏差の要因

フラジリティカーブの評価に必要な不確実性は、①地震危険度の設定に関する不確実性、②サイトの地震動評価に関する推定誤差、③地盤増幅特性の推定誤差、④地震動強さによる建物の応答評価誤差、⑤建物の耐力のばらつき、⑥モデル化の不確定性の6つに分けられる。

①は使用した地震カタログや地震領域の設定、危険度解析の方法等によって異なるものの、基本的には、長期間の地震活動の調査ならびに統計処理によって評価される。統計データの取得期間が短い現状では、この種の不確実性を改善する余地は少ない。②は基本的には距離減衰式の誤差によるものであるが、不均一かつ不整合の自然地盤を通しての地震動の伝播という波動学的に困難な問題に起因しており、早急の改善は期待できない。③は工学的基盤面から、地表面あるいは対象施設の基礎底面までの地震動の増幅特性の推定誤差である。この誤差は、地盤情報の精度や量、評価手法によって異なる。④は地震動強さ（最大加速度、最大速度、最大変位、加速度応答スペクトル、計測震度等）によって異なる。規模別の地震動による時刻歴応答解析を種々行い、一定のクライテリアを超えるか超えないかを被害発生基準とし、統計処理を行うことで、リスク評価に必要な精度で解析的に評価できる。⑤は設計基準や設計上の安全への配慮、施工精度や材料強度のばらつき等から構成されるばらつきである。統計的なばらつきであることから基本的には改善の対象とはならないが、今後の設計法の改善、ユニット施工、新材料の登場によっては改善の余地はある。⑥は解析手法やモデル化の際の仮定に起因した不確定性であり、改善の対象となるものの、被害事例や実験結果による統計的裏付けが必要である。

①と②は、地震ハザード解析に係るばらつき、③～⑥はフラジリティカーブの評価に係るばらつきである。被害事例に基づく統計解析によるばらつきは、②～⑥が複合されたものである。それぞれを独立と仮定すると、統計解析によって求められるばらつき（複合偏差） $\zeta_z$ は、以下のように評価できる。

$$\zeta_z = \sqrt{\zeta_2^2 + \zeta_3^2 + \zeta_4^2 + \zeta_5^2 + \zeta_6^2} \quad (2.6-2)$$

なお、シナリオ地震に基づく地震リスク評価においては、①のばらつきは含めないのが一般的である。

図 2.6-2 は、不確実性の要因を概念的に示したもので、建物の層間変位を被害の判断基準とした例である。なお、⑥のモデル化の不確実性は、②～⑤の各所に含まれるものとする。

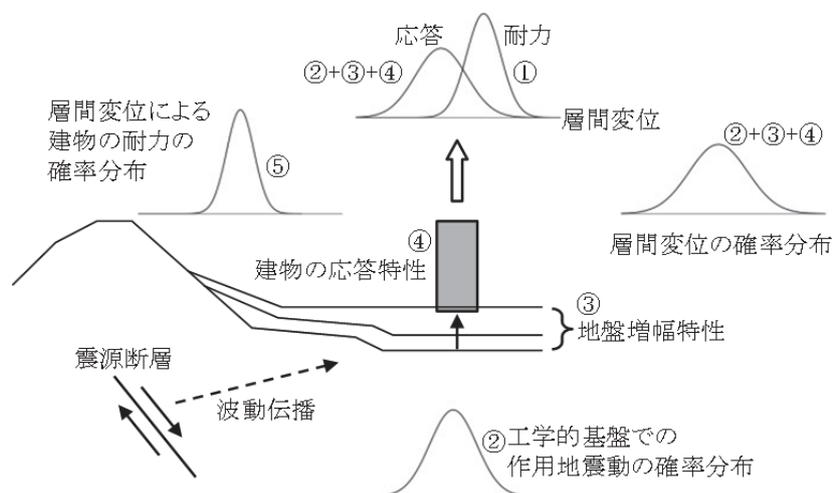


図 2.6-2 不確実性の要因

## (2) 統計解析による複合偏差

フラジリティカーブを、被害事例から統計的に評価する試みは、兵庫県南部地震以降活発になり、建築物<sup>1),5),6)</sup>、道路橋脚<sup>2),3),7)</sup>を対象に進められた。また、日本と米国の道路橋のフラジリティカーブを比較した研究<sup>4),8)</sup>等がある。統計解析により評価したフラジリティカーブのばらつき（対数標準偏差）の比較例を表 2.6-1<sup>9)</sup>に示す。表 2.6-1 より、フラジリティカーブの複合偏差 $\zeta_c$ は、建築物では 0.5～0.8 程度、道路橋脚では、0.4～0.7 程度の範囲と考えられる。建築物に比べ道路橋脚の複合偏差が小さいのは、道路橋脚は単層が多く、比較的均質に設計/施工されているからと考えられる。一方の建築物は多層であり、構造的にも複雑で規模や用途も多様である。

事業者内の製造設備や貯蔵設備は、比較的均質に設計/施工されていること、また、距離減衰式の誤差のばらつき<sup>例えば 10)</sup>は、概ね対数標準偏差で 0.45～0.50 程度であること、などから、製造設備や貯蔵設備のフラジリティカーブの複合偏差は、0.5～0.7 程度が妥当と考える。

表 2.6-1 対数標準偏差の報告例 (吉川ら<sup>9)</sup>)

構造物	損傷形態	対数標準偏差	参考文献
高速道路橋	C	0.59	中村他(1998)
	B	0.45	
	AS or A	0.43	
Highway Bridges	minor	0.84	Shinozuka et al. (2001)
	moderate	0.72	
	major	0.65	
	collapse	0.67	
Highway Bridges	slight	0.6 (recommended)	Mader(1999)
	moderate		
	extensive		
	complete		
Railway Bridges	slight	0.45	HAZUS99(1999)
	moderate	0.55	
	extensive	0.60	
	complete	0.70	
Buildings (low-rise reinforced concrete)	slight	0.75	望月他(2000)
	moderate	0.76	
	extensive	0.81	
低層戸建住宅	小破	0.538	望月他(2000)
	中破	0.445	
	大破	0.467	
中高層住宅	小破	0.672	望月他(2000)
	中破	0.679	
	大破	0.677	
Buildings (low-rise wood frame)	slight	0.84	Grossi(2000)
	moderate	0.90	
	extensive	1.00	
	complete	0.97	

参考文献

- 1) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫: 1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地震動分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 502 号, pp.61-68, 1997.
- 2) 中村孝明, 長沼俊彦, 静間俊郎, 篠塚正宣: 統計解析による道路橋脚の地震時損傷確率に関する研究, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.3, pp.3165-3170, 1998.11.
- 3) 山崎文雄, 大西淳一, 田山聡, 高野辰雄: 高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.3, pp.3491-3496, 1998.
- 4) Shinozuka, M.: Statistical Analysis of Fragility Curves, Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability its Application, Taiwan,R.O.C., 1999.
- 5) 村尾修, 山崎文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, pp.189-195, 2000.
- 6) 望月智也, 中村孝明: 多項反応モデルによる地震時損傷度曲線の統計的推定, 土木学会, 第 2 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp.45-50, 2000.
- 7) Grossi, P.: Earthquake Damage Assessment, Expert Opinion to Fragility Curves, 8th ASCE Specially Conference on Probabilistic Mechanics and Structure Reliability, PMC2000-123, 2000.
- 8) Shinozuka, M, Feng, M., q., Kim, H., Uzawa, T. and Ueda, T.: Statistical Analysis of Fragility Curve, Technical Report submitted to MCEER under Federal Highway Administration Agency,

2001.

- 9) 吉川弘道, 大滝健, 前田欣昌, 中村孝明: 地震リスク解析における fragility 曲線と地震損失関数, コンクリート工学会誌, Vol.45, No.10, pp.26-34, 2007.
- 10) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹: 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第 24 回地震工学研究発表会公演論文集, pp.161-164, 1997

### 2.6.3 耐震性能の評価

fragility 曲線の評価で必要となる作用地震動の強さ（加速度，速度，変位等）に対応した各種構造物の耐震性能（耐力中央値）を評価する。

#### 【解説】

耐力中央値を評価する方法として、時刻歴地震波形（実地震波を用いる方法、模擬地震波を用いる方法）を用いて統計的（二項尤度モデル<sup>1)</sup>）評価方法、プッシュオーバー解析による方法、耐力スペクトル法<sup>2)</sup>などがある。さらに過去の被害事例から統計的に評価する方法もある。どの手法を用いるかは、構造物のタイプ、被害の発生メカニズム、さらに得られる情報の精粗によって適宜選定する。

「付録－3 耐力中央値の評価方法」に耐力スペクトルを用いた、耐力中央値の計算方法を例として示す。

#### 参考文献

- 1) 中村孝明・水谷守：地震時損傷確率の統計的評価手法に関する一提案，土木学会第 51 回年次学術講演会 1-A, p.938.,1996.9.
- 2) Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.: HAZUS-MH MR3 Technical Manual, 2003.

### 2.6.4 耐力値の工学的基盤での最大加速度換算

構造物の耐力中央値は、工学的基盤面での最大加速度に換算し、それぞれの耐震性能を比較する。

#### 【解説】

臨海部コンビナート施設は、様々な設備や構造物で構成され、その数は膨大である。そこで、それぞれの耐震性能を比較するため、工学的基盤面での耐力中央値  $c_m$  (cm/sec<sup>2</sup>) に換算する。まず、工学的基盤面における基準化加速度応答スペクトル  $S_a^{NB}(T)$  を設定する。基準化加速度応答スペクトルは、加速度応答スペクトル値を最大加速度で除したもので、 $T$  は周期、添え字  $a$  は加速度、 $N$  は基準化、 $B$  は基盤の意味を持つ。基準化加速度応答スペクトルは、適当な距離減衰式から求めるか、あるいは国土交通省告示に示される応答スペクトルや免震構造設計指針（日本建築学会）に示される応答スペクトルを用いることもできる。

「2.4.1 地盤増幅特性の評価」に示した方法を使い、地盤の加速度応答スペクトル

比の平均値  $\bar{R}_a(T)$  を求め、地表面の基準化加速度応答スペクトル  $S_a^N(T)$  を求める。図 2.6-3 に、加速度応答スペクトル比とそれぞれの基準化加速度応答スペクトルの関係を示す。

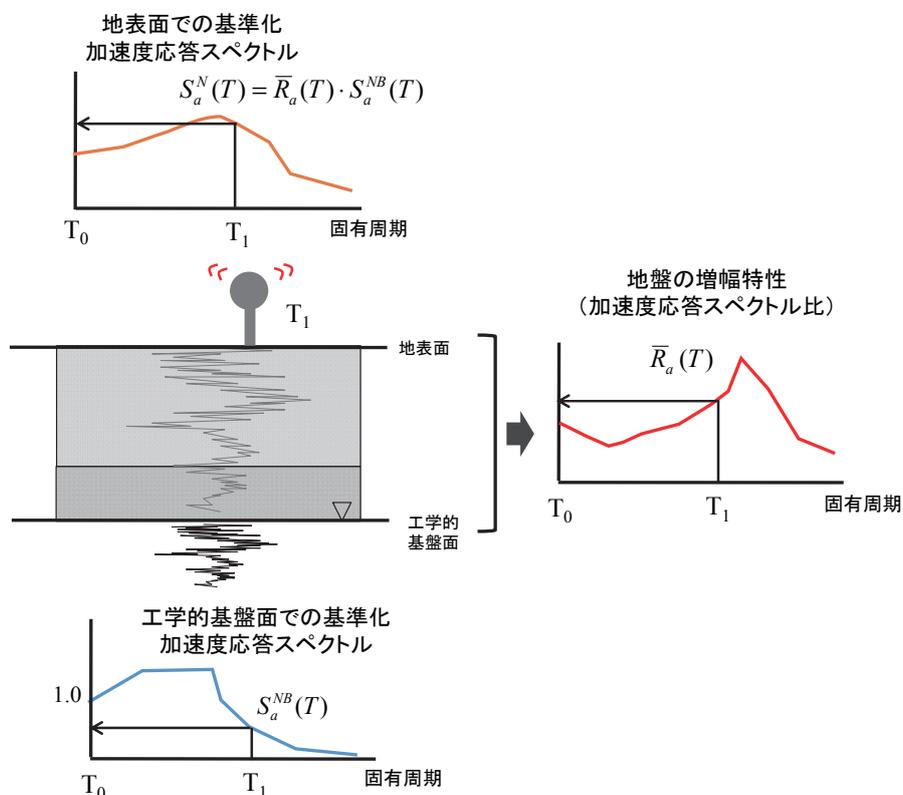


図 2.6-3 加速度応答スペクトル比と基準化加速度応答スペクトルの関係

地表面の基準化加速度応答スペクトル  $S_a^N(T)$  は、以下のように求められる。

$$S_a^N(T) = \bar{R}_a(T) \cdot S_a^{NB}(T) \quad (2.6-3)$$

次に、対象構造物の 1 次固有周期  $T_1$ 、地表面での応答加速度換算の耐力中央値を  $a_m$  ( $\text{cm}/\text{sec}^2$ ) とすると、工学的基盤面での最大加速度換算の耐力中央値  $c_m$  は、次式のように  $a_m$  を地表面の基準化加速度応答スペクトル  $S_a^N(T_1)$  で除すことで求められる。なお、 $a_m$  は建屋や装置、または着目部位の軽微、中破、大破などの耐力を応答加速度に換算したものである。

$$c_m = \frac{a_m}{S_a^N(T_1)} \quad (2.6-4)$$

(2.6-4)式は(2.6-3)式を用いて、次式のように書き換えられる。

$$c_m = \frac{a_m}{\bar{R}_a(T_1) \cdot S_a^{NB}(T_1)} \quad (2.6-5)$$

一般的に、シナリオ地震による地震動は、表層地盤の増幅特性などのサイト固有の影響を取り除くため、強震動予測や距離減衰式による地震動は、工学的基盤面（正しくは工学的解放基盤面）で設定するケースが多い。ここで示した方法は、構造物の耐力を工学的基盤面に換算することで、工学的基盤面での作用地震動と耐震性能を対比できるようにしている。また、様々な設備や構造物の耐震性能を横並びに比較できる利点もある。図 2.6-4 は、構造物の耐力を工学的基盤面に換算するフローを示している。

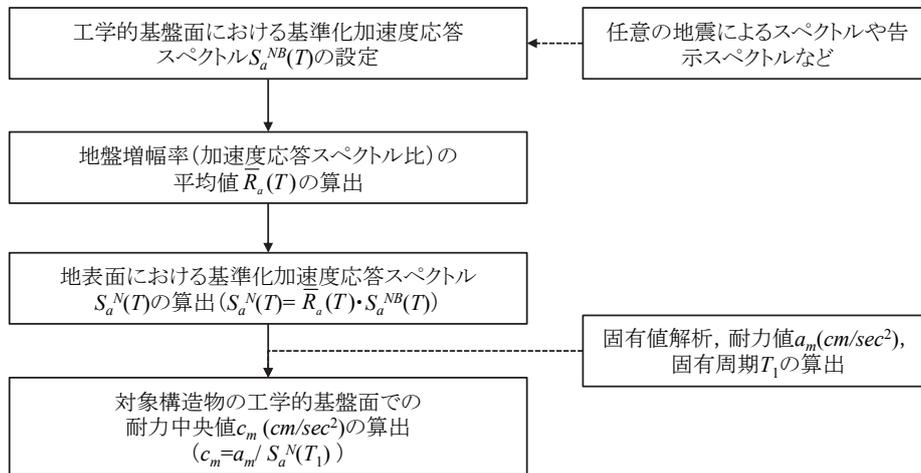


図 2.6-4 工学的基盤面での耐力中央値の算出フロー

上記の方法は、地盤の応答や構造物の応答が線形と見做せる場合に用いることができる。なお、地盤の非線形挙動を考慮する場合は「付録－4 地盤の非線形性を考慮した損傷確率の評価」に、構造物の弾性限界を超える状態の耐力の評価は「付録－3 耐力中央値の評価方法」に、それぞれ記している。

## 2.7 地震リスク評価

### 2.7.1 ターゲット地震の選定

事業所に被害を発生させる地震は複数想定できることから、どのような地震に対し、対策を検討すべきか、シナリオ地震の中からターゲットとなる地震を選定する。

#### 【解説】

津波被害を伴う海域での地震、陸域で発生する直下型の地震など、地震によって被害の

様態が変わり、注力すべき地震対策も変わってくる。そして、どのような地震に対しても万全な対策を講ずることは、現実的に難しくなることが多いため、発生頻度や被害の大きさ、社会的関心度を勘案し、シナリオ地震の中からターゲットとなる地震を絞り込む必要がある。シナリオ地震については「2.3.2 地震危険度の設定」に説明がある。

表 2.7-1 は、関西地域に所在する事業所の例で、事業所に被害を発生させる可能性のあるシナリオ地震を、生産停止期間の大きい順に、震源名、マグニチュード、年発生確率、累積確率、工学的基盤面での最大加速度、津波高さ、復旧期間期待値（生産停止、あるいは製品の出荷停止期間の期間値）を上位 20 まで示している。これをイベントリスクリストと呼ぶ。同表より、事業所にとって甚大な被害となるシナリオ地震は、事業所の直下で発生する背景地震（M7.0）で生産停止期間の平均（RTE）は 169 日となる。一方、比較的知られている上町断層（M7.5）では、161 日、津波を伴う南海トラフ全域地震（M9.0）では 57 日となっている。地震の発生確率ならびに社会的影響度等を勘案すると、ターゲット地震としては、上町断層（M7.5）と南海トラフ全域地震（M9.0）が適当と考えられる。また、目標復旧期間を 30 日と仮定した場合、生駒断層帯地震（M7.5）は、目標を満たしているものの、これを超えるシナリオ地震については、地震対策が必要であることが分かる。

なお、「2.7.2 復旧曲線の評価」や「2.7.3 健全度曲線の評価」に示す復旧曲線や健全度曲線は、シナリオ地震毎に異なった曲線となる。このため、ターゲット地震を絞り込み、その地震に対して描画し、対策を検討することになる。

表 2.7-1 イベントリスクリストの例

No.	シナリオ地震 震源名 ( ) 震央位置	気象庁マグ ニチュード	年発生 確率 (%/年)	累積 確率 (%/年)	PBA (cm/sec <sup>2</sup> )	津波高さ (T.P.+m)	復旧期間 期待値(日)
1	(135.45, 34.55)	M7.0	0.0003	0.0003	511.8	-	169
2	上町断層帯	M7.5	0.0986	0.0989	494.4	-	161
3	(135.35, 34.55)	M7.0	0.0003	0.0992	477.0	-	152
4	(135.45, 34.45)	M7.0	0.0003	0.0995	464.3	-	145
5	(135.35, 34.45)	M7.0	0.0003	0.0998	439.8	-	132
6	(135.55, 34.55)	M7.0	0.0003	0.1001	418.0	-	118
7	中央構造線 (和泉山脈)	M7.7	0.0968	0.1968	380.9	-	94
8	(135.55, 34.45)	M7.0	0.0003	0.1971	379.4	-	93
9	(135.45, 34.65)	M7.0	0.0003	0.1974	378.2	-	92
10	(135.35, 34.65)	M7.0	0.0003	0.1977	356.4	-	76
11	(135.45, 34.55)	M6.5	0.0013	0.1990	348.8	-	70
12	(135.25, 34.55)	M7.0	0.0003	0.1993	347.0	-	69
13	南海トラフ全域 (M9.0)	M9.0	0.0193	0.2186	268.3	4.0	57
14	(135.35, 34.55)	M6.5	0.0013	0.2198	326.0	-	52
15	(135.25, 34.45)	M7.0	0.0003	0.2201	321.1	-	49
16	(135.55, 34.65)	M7.0	0.0003	0.2204	316.9	-	45
17	(135.45, 34.45)	M6.5	0.0013	0.2217	312.9	-	42
18	(135.45, 34.35)	M7.0	0.0003	0.2220	299.7	-	31
19	生駒断層帯	M7.5	0.0001	0.2220	289.1	-	23
20	六甲・淡路断層帯(六甲南縁)	M7.9	0.0039	0.2259	288.6	-	22

### 2.7.2 復旧曲線の評価

復旧曲線は、システムモデルを用いて確率論的に評価する。なお、復旧曲線には、性能を確率変数として求めた期待値を示す D 曲線と、復旧期間を確率変数として求めた期待値を示す T 曲線がある。地震リスクマネジメントの目標や方針に則り、適宜選択して評価する。

#### 【解説】

復旧曲線は、本来の性能が低下あるいは停止し、その後元の性能に回復するまでの経時的なプロセスを描いたもので、復旧過程を視覚化した曲線である。横軸は復旧に要する時間、縦軸は性能である。臨海部コンビナート施設の場合には、性能は通常時の生産量、あるいは出荷量を 1.0 に基準化する。一方、地震被害の発生や復旧時間は不確実性を伴い、確定的に設定することはできないことから、確率論的アプローチが必要である。この場合、多数の復旧過程が予想され、予想に漏れがない限りこの中の一つは必ず実現することになるが、実現するであろう復旧曲線を特定することはできないため、平均的な曲線を求め、これを復旧曲線とする。

図 2.7-1 に D 曲線を、図 2.7-2 に T 曲線を示す。D 曲線は、復旧率を確率変数に縦軸に分布する曲線群の平均値を復旧曲線に対して、ステップ状に結んだ曲線である。一方の T 曲線は、復旧期間を確率変数に、横軸に分布する曲線群の平均値を復旧率に対して、ステップ状に結んだ曲線である。図 2.7-1 と図 2.7-2 とともに、鉛直軸は確率、あるいは確率密度を表す。

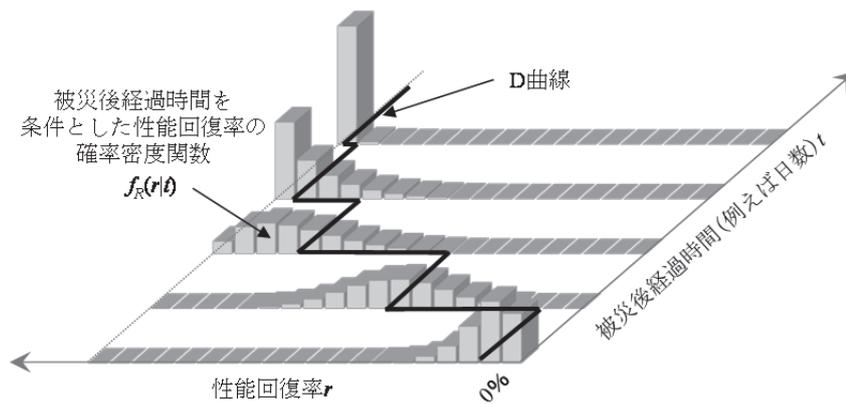


図 2.7-1 復旧曲線 (D 曲線) の概念図

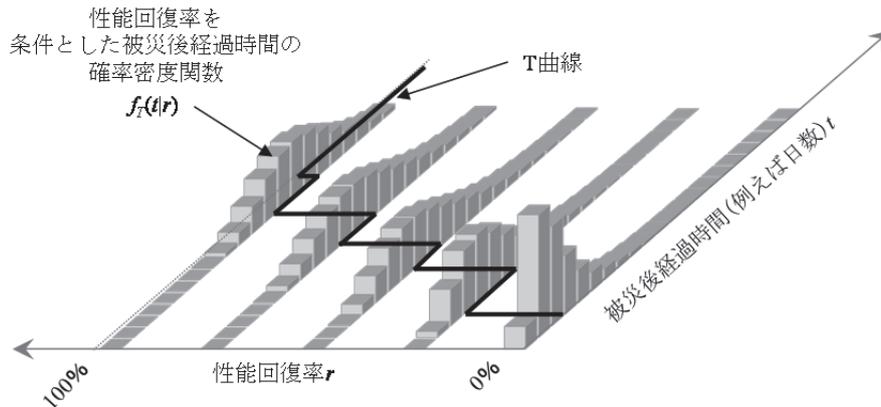


図 2.7-2 復旧曲線（T 曲線）の概念図

D 曲線と T 曲線は相互補完的であり、一方が求まれば、他方を求めることができる。T 曲線はシステムの機能が限定され、その機能の復旧期間を知りたい場合に有効とされる<sup>1)</sup>。一方、上水や電力システムのように、供給量を性能と捉え、その低下やその復旧過程を知る場合には、D 曲線は実状をよく説明できるとの報告<sup>2)</sup>がある。どちらの復旧曲線を用いるかは、地震リスク評価やリスクマネジメントの目的や方針によって、適宜判断する。

D 曲線  $R_D(t)$  及び T 曲線  $R_T(r)$  は以下のように求めることができる。

$$R_D(t) = \int_0^{1.0} r \cdot f_R(r|t) dr = \int_0^{1.0} G_R(r|t) dr \quad (2.7-1)$$

$$R_T(r) = \int_0^{\infty} t \cdot f_T(t|r) dt = \int_0^{\infty} G_T(t|r) dt \quad (2.7-2)$$

ここに、 $t$  は時間（復旧期間）、 $r$  は復旧率（性能回復率）を表す。また、 $f_R(r|t)$  は時間  $t$  を条件とした復旧率  $r$  の確率密度関数であり、 $f_T(t|r)$  は復旧率  $r$  を条件とした時間  $t$  の確率密度関数である。一方、 $G_R(r|t)$  は時間  $t$  を条件とした復旧率  $r$  の超過確率関数であり、 $G_T(t|r)$  は復旧率  $r$  を条件とした時間  $t$  の超過確率関数である。上式については「付録－5 超過確率の積分による平均値」に記している。

$G_R(r|t)$  と  $G_T(t|r)$  には以下の関係がある。

$$1 - G_R(r|t) = G_T(t|r) \quad (2.7-3)$$

(2.7-3)式より、復旧曲線を求めるには、 $G_R(r|t)$ 、もしくは  $G_T(t|r)$  のどちらか一方を求めればよい。

$G_T(t|r)$ から、システム全体の復旧期間の期待値、すなわち生産停止期間の平均値（RTE; Recovery Time Expectancy）を求めることができる。RTE は以下ようになる。

$$RTE = \int_0^{1.0} R_T(r)dr = \int_0^{1.0} \int_0^{\infty} G_T(t|r)dt dr \quad (2.7-4)$$

RTE は、図 1.3-2 に示す復旧曲線（T 曲線）の左側面積に相当し、生産停止期間の平均値になる。

#### 参考文献

- 1) 静間俊郎, 中村孝明: 復旧曲線の理論的考察と BCP への適用, 土木学会第 1 回地震リスクマネジメントと事業継続性シンポジウム論文報告集, pp.231-236, 2009.11
- 2) Shinozuka, M., Chang, S.E., Cheng, T-C., Feng, M., O'Rourke, T.D., Saadeghvaziri, M.A., Dong, X., Jin, X., Wang, Y. and Shi, P. : Resilience of integrated power and water systems, Seismic Evaluation and Retrofit of Lifeline Systems, Articles from MCEER's Research Progress and Accomplishments Volumes, pp.65-86, 2004.

### 2.7.3 健全度曲線の評価

健全度曲線は、臨海部コンビナート施設に要求される性能（例えば生産量）を、地震時においても維持できる確率を、発災からの経過時間とともに示した曲線である。

#### 【解説】

事業者は、発災時においても一定量の製品を市場に供給することが求められ、この要求は発災からの経過時間と伴に高まる傾向がある。健全度曲線は、この要求に応えられる可能性（健全確率）を示した曲線で、経過時間とともに復旧が進むため、右肩に上昇する。

時間依存の健全確率を  $p(t)$  とすると、復旧率（性能回復率） $r$  の超過確率関数  $G_R(r|t)$  から以下のように求めることができる。

$$p_{r>s}(t) = G_R(r = s | t) = \int_s^{1.0} f_R(r|t)dr \quad (2.7-5)$$

ここに、 $s$  は必要となる最小限の性能（例えば、製品供給量）であり、 $f_R(r|t)$  は時間  $t$  を条件とした復旧率（性能回復率） $r$  の確率密度関数である。(2.7-5)式にて求められる関数を、本ガイドラインでは健全度曲線と呼び、概念図を図 2.7-3 に示す。図の軸は経過時間と健全確率を表し、鉛直軸は性能回復率の確率関数、または確率密度を示している。図では、 $s$  を 50% としている。

任意の時間断面において健全確率が低く、許容できる範囲を下回るのであれば、何らかのハード対策が必要になる。

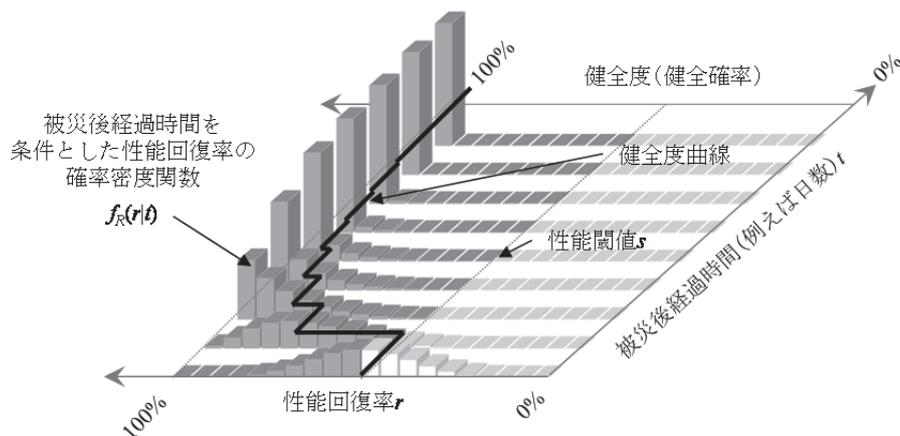


図 2.7-3 健全度曲線の概念図

#### 2.7.4 システムの復旧期間と復旧期間の超過確率関数

復旧曲線、ならびに健全度曲線を求めるには、システムモデルの構成（直列型、並列型、混合型）を考慮した復旧期間の超過確率関数（ $G_T(t|r)$ ）を求める必要がある。

**【解説】**

システムの機能停止は、各ユニットやコンポーネントの被害によって引き起こされ、各ユニットやコンポーネントは同時に復旧できるものとする。同時復旧下では、直列システムの復旧期間は次式のように求められる。

$$T = \max(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (2.7-6)$$

ここに、 $T_i, i=1 \sim n$  はユニットやコンポーネントの復旧期間の確率変数、 $n$  はその総数である。 $T$  はシステムの復旧期間の確率変数である。 $T_i$  は、「2.5.4 イベントツリー/フォールトツリーの活用」で説明したイベントツリーを用いて評価できる。並列システムの復旧期間は次式のように求められる。

$$T = \min(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (2.7-7)$$

なお、式中の  $\max()$  は、それぞれの確率変数（復旧期間）の最大値が選択され、 $\min()$  は最小値が選択される。復旧期間の超過確率関数  $G_T(t|r)$  は、ユニットやコンポーネントの損傷事象の独立を前提に、直列システムは以下となる。

$$G_T(t|r) = 1 - \prod_{i=1}^n \{1 - G_{T_i}(t|r)\} \quad (2.7-8)$$

ここに、 $G_{T_i}(t|r)$ ,  $i=1\sim n$  は、ユニットやコンポーネントの復旧率（性能回復率） $r$  を条件とした復旧期間の確率関数である。並列システムの場合は以下ようになる。

$$G_T(t|r) = \prod_{i=1}^n G_{T_i}(t|r) \quad (2.7-9)$$

したがって、(2.7-8), (2.7-9)式を使い、システムの復旧期間の超過確率関数  $G_T(t|r)$  を求めることができる。なお、各ユニットやコンポーネントの超過確率関数  $G_{T_i}(t|r)$  は、フラジリティカーブによって求める。

一方、システムの超過確率関数  $G_T(t|r)$  を求める際、各ユニットやコンポーネントの損傷相関を考慮する必要がある。損傷相関は、構造物間の損傷事象の統計的相関を意味し、建屋が倒壊すれば内在する設備機器も損壊する、といった物理的な従属関係とは異なる。相関を考慮する方法は、一般的に、モンテカルロシミュレーション、数値積分、さらに特性値（平均値や標準偏差）のみを対象とした解析的方法などがある。本ガイドラインでは、数値積分による方法を推奨し、「付録ー7 損傷相関の評価方法」にその方法を示す。

### 3. 地震リスクマネジメント

#### 3.1 目標の照査と対策の要否

地震リスクの評価結果（復旧曲線や健全度曲線）に、目標とする復旧期間や健全確率を併記し、対策の必要性を関係者間で共有する。

##### 【解説】

ターゲット地震による復旧曲線、健全度曲線を作成し、これに目標とする復旧期間や健全確率を併記する。曲線と目標との乖離の程度を確認し、地震対策が必要かどうかを検討する。復旧曲線ならびに健全度曲線の例をそれぞれ図 3.1-1、図 3.1-2 に示す。図 3.1-1 は復旧曲線に、目標復旧期間と目標性能の 2 つの照査目標を設定している。具体的には 3 日間で 50% の性能の回復が目標となる。図 3.1-2 は健全度曲線に照査基準は目標健全確率と目標期日の 2 つの照査目標を設定している。具体的には、3 日以内に 90% の健全度を確保する、となる。照査目標を満たすには、復旧曲線、健全度曲線ともに、図のハッチングの領域を通らなければならない。図の曲線は、ハッチング領域から離れており、対策が必要であることが分かる。

一方、目標復旧期間と目標性能の 2 つを照査基準とすることが煩雑な場合、どちらか一方を照査することでもよい。これは目標健全確率と目標期日についても同様である。

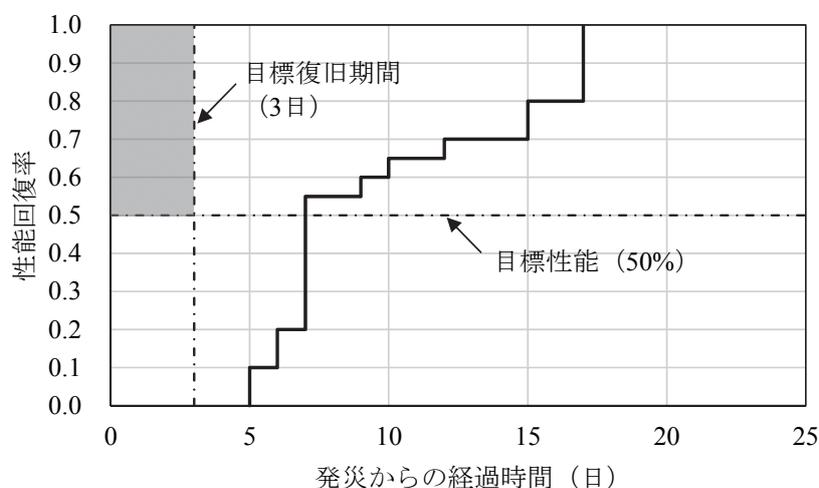


図 3.1-1 復旧曲線と照査目標

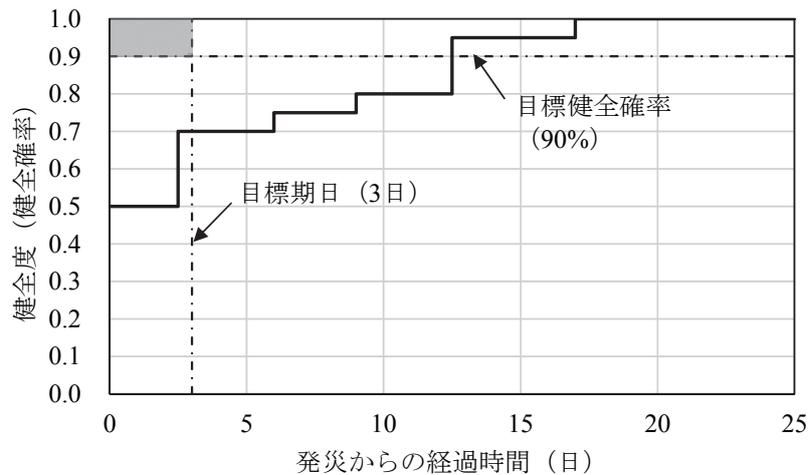


図 3.1-2 健全度曲線と照査目標

各曲線と目標との乖離が大きい場合には、大規模かつ抜本的な対策が必要になることを認識する必要がある。

## 3.2 地震対策

### 3.2.1 地震対策の分類

地震リスクマネジメントでは、防災的な観点、事業継続的な観点、経営的な観点など、様々な観点からの対策が行われる。地震対策には、ハード対策 (physical)、ソフト対策 (management)、金融対策 (finance) があり、これらは地震リスクマネジメントの対策として包含される。

#### 【解説】

地震対策を分類して図 3.2-1 に示す。地震リスクマネジメントでは、構造物や施設の補強、防消火設備の拡充、製造設備やユーティリティのリダンダンシーの確保など、被害の抑止・抑制する対策が主となる。これらの対策に加えて、バックアップ機能の整備や在庫調整等を含めて、一般的にハード対策と呼ぶ。BCP で求められる対策は、防災マニュアルの整備、防災教育/訓練/演習、緊急連絡網の整備、安否確認など、発災後の人々の行動の適正化を促す対策等で、これらをソフト対策と呼ぶ。ソフト対策は、二次的に発生する火災/延焼や危険物質の漏洩/拡散などを抑止し、人命救助や早期の事業再開などにも有効である。一方、金融対策は、被害の発生は抑止できないものの、一定のコストを他者 (保険会社等) に支払い、損害額を肩代わりしてもらうことで、経営上 (財務上) のリスクを減らすことができる。

BCP や ICS は、発災後の人々の適切な行動や事後対応を中心とした対策になる。このうち事後対応は、事前の被害想定に基づいた行動規範を教育や訓練によって改善される。しかしながら、実際の被害状況が、事前の訓練や防災教育の範囲内であるとは限らない。想

定を超える事態や予期せぬ事態が起きると、人々は混乱し、かえって被害が拡大するような事態もある。事実、東日本大震災の経験から「マニュアル通りにはいかない、柔軟な対応が必要」という多数の意見が、生産事業者から出された。地震災害は揺れのみならず、液状化や津波などが生じる。また広域で複合災害であることから、事業停止が長期化するような致命的な被害にならないような事前のハード対策が特に重要になる。

地震リスクマネジメントの対策は、ソフト対策や金融対策も含まれるものの、事前防災の考えの下、被害を抑止し軽減するためのハード対策を進めることが喫緊の課題である。例えば、文献 1) によれば、阪神・淡路大震災における生産施設の主な被害要因は、製造施設の位置ずれや転倒、ユーティリティの不具合などであった。このため設備の支持補強や転倒防止等の対策が重要であることは明らかであり、耐震補強などのハード対策は、確実なリスク軽減効果を期待できる。

一方、東日本大震災の生産施設の被害状況としては、より広域的かつ複合的な影響もたらされた。特に、文献 2) ～5) の各資料によれば、サプライチェーン問題が最も深刻に表れた自動車産業では、部品メーカー、完成車メーカーとも生産拠点・設備に被害を受け、操業停止を余儀なくされた。例えば、トヨタ自動車は、震災後、トヨタ車の生産を委託している関連企業の工場を含め、国内の全ての完成車工場が生産停止に追い込まれた。日産自動車の生産再開が最も早かった(4月10日)が、トヨタ自動車では、順次生産を再開し、4月18日には全ての完成車工場が操業を再開した。

完成車メーカーが操業停止となった背景には、被災地の完成車工場の直接的被害によるもののみならず、部品メーカー段階での部品調達・生産の困難・不安定などがあったからである。自動車にはマイコンと呼ばれる制御用電子部品を多数必要としているが、半導体大手の工場(ルネサスエレクトロニクスの茨城県那珂工場)が被災したことで、国内外の自動車メーカーに一時生産停止などの影響を及ぼした。

このような自動車産業のサプライチェーン間では、在庫を極力持たない「ジャストインタイム方式」が採られており、震災によりたちまち部品・素材不足に陥り操業停止に追い込まれた。地震の揺れなどによる直接的な設備被害よりもサプライチェーンの寸断による生産停止の影響の方がはるかに大きかった。災害の影響は、サプライチェーンの上流から下流へと伝わる中で次第に増幅される傾向を持つ。自動車産業では影響は国内にとどまらず、日本企業の海外工場や海外企業にも影響を及ぼした。

サプライチェーンの強靱化は日本経済の成長にも大きく寄与することは明らかであるが、サプライチェーンの効率性の追求と強靱化の推進をバランスよく行っていくことも求められている。コンビナート施設にある石油産業や化学産業などの工場は、自動車産業とは基本的な性格が異なっているが、それらのサプライチェーンの上流の被害が下流の全般的な被害につながりかねないという点では同根の問題を持っており、事業継続計画の導入を図り、ソフト対策とともにハード対策により事前防災対策を推進することが喫緊の課題となっている。

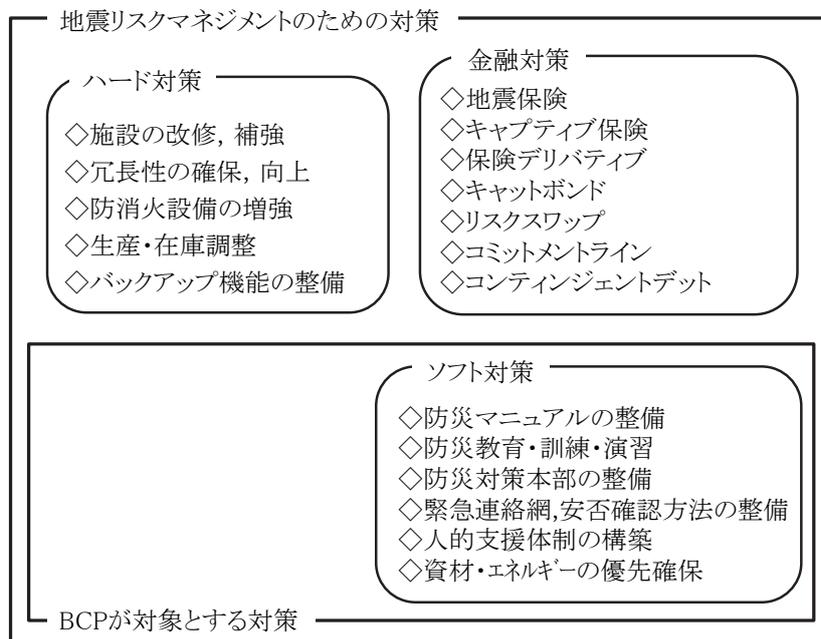


図 3.2-1 地震リスクマネジメントの対策の分類

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告 機械編 機械設備の被害, P.428, 1998.8.
- 2) 鎌田純一, 中島かおり: 東日本大震災による我が国ものづくり産業への影響, 立法と調査 No.317, 参議院事務局企画調整室, pp.137-148, 2011.6.
- 3) 小野憲司, 神田正美, 赤倉康寛: 自動車産業サプライチェーンにおける東日本大震災のインパクト分析, 京都大学防災研究所年報 第 57 号 B, pp.21-35, 2014.6.
- 4) 中山浩史, 山田和馬: 大震災から 5 年 再建への道程④ 部品供給網弱さ浮き彫り 車メーカー、2 次下請け把握せず, 日本経済新聞朝刊, 2016.1.24.
- 5) 浜口伸明: 大震災から 5 年 日本企業の供給網⑤ 効率性と強靱性の両立を, 日本経済新聞朝刊「経済教室」, 2016.2.16.

**3.2.2 ハード対策, ソフト対策, および金融対策の判断の流れ**

ハード対策、ソフト対策、金融対策の効果や費用などを考慮し、これら対策の組合せを含めた効率的な対策を選定する。

**【解説】**

図 3.2-2 に、ハード、ソフト、金融対策の判断の流れを示す。まず、地震による被害の状況や生産停止期間を把握するため、地震リスク評価を行う。その結果、特に生産停止期間

が長く、製品の供給責任に問題が生じると判断される場合には、ハード対策を検討する。このことは、企業の社会的信用と責任に係わる重要な問題として受止める必要がある。具体的には、「3.1 目標の照査と対策の要否」に示すように、復旧曲線に目標復旧期間を併記し、復旧曲線が目標復旧期間を超えるか否かを検討する。次に、財務影響分析を実施し、発災時の各種業績指標（流動比率、自己資本比率など）から、債務の不履行や、その他財務上の問題が懸念される場合には、金融対策を検討する。必要に応じてハード対策を見直すことも検討する。

ソフト対策は、従業員の防災意識の向上、発災時の適切な行動の促進、二次災害の抑止などの観点からも、実施すべき対策である。

地震は、揺れ、液状化、津波などの要因により構造物が損傷することで、事業者にとって実質的な損害になる。このため、構造物の損傷を抑止/軽減できるハード対策は重要である。しかしながら、ハード対策は高額になる傾向があることから、費用面での制約上十分な対策を実施できず、防災目標（例えば、目標復旧期間）を満たすことが出来ない場合もある。このような場合は、「4.2 隣接する事業所間の広域連携」に示すように、被災地域外に位置する事業所との製品供給に関する連携体制を整えるなどの、ソフト面での対策で対応することも考えられる。

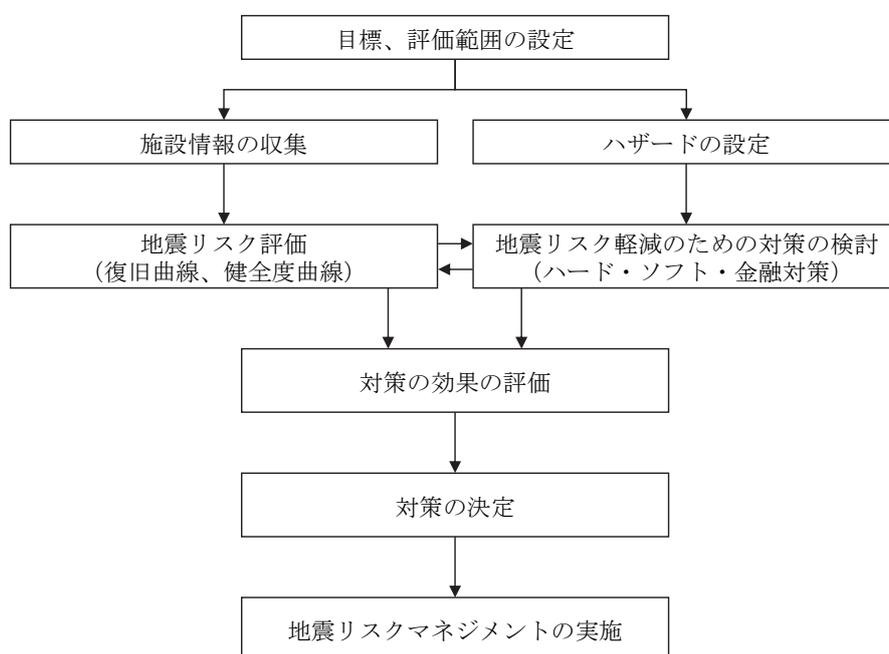


図 3.2-2 ハード・ソフト・金融対策の判断と地震リスクマネジメントの実施の流れ

### 3.3 ハード対策の優先順位

効果的なハード対策を実施するには、地震リスク評価の結果にもとづき、脆弱性や影響度の高い構造物から対策を実施することが肝要である。そこで、ハード対策の優先順位を抽出するために、コンポーネント、または被害要因毎にボトルネック指標を計算する。これを大きい順にリスト化し、ハード対策の優先順位を明確にする。

#### 【解説】

多数の施設や構造物で構成された複雑なシステムでは、ボトルネックとなる設備や構造物、事業停止を長期化するような被害要因、また対策の優先順位などを把握することは難しい。そこで、ボトルネックを見出す定量的指標値を評価する。これをボトルネック指標 (Bottleneck Index) (以下、 $BI$ ) と呼ぶ。以下  $BI$  の計算方法を述べる。

$BI$  はコンポーネント、または被害要因毎に評価する。 $BI$  は生産機能や製品出荷機能を模したシステム全体機能への影響度 (重要性) と復旧期間の期待値の積で表される指標であり、次式で示される。

$$BI_i = e_i \cdot E(T_i), \quad i=1 \sim n \quad (3.3-1)$$

ここに、 $i$  は各コンポーネント、または被害要因、 $n$  はその総数、 $e_i$  は生産機能や製品出荷機能への影響度で、最大を 1.0 とする。 $E(T_i)$  は各コンポーネント、または被害要因の復旧期間の期待値で、次式から求められる。

$$E(T_i) = \sum_{all\ j} p_j \cdot t_j \quad (3.3-2)$$

上式で、 $j$  は被害形態、 $p_j$ ,  $t_j$  はそれぞれ被害形態の発生確率と復旧期間である。(3.3-1)式より  $BI_i$  は時間の単位を持つ。 $BI_i$  の算出例を表 3.3-1 に示す。

なお、表 3.3-1 は「付録－2 地震リスクの評価例」を引用している。コンポーネントが所在するユニット名、コンポーネントの被害要因、影響度、復旧期間の期待値、 $BI$  の順で示し、上位 20 まで示している。影響度は当該コンポーネントが損傷して、生産活動が全面的に停止する場合を 1.0 としている。例えば影響度 0.7 は、当該コンポーネントが損傷しても 30% の生産が可能であることを示している。同表より、大規模液状化被害が上位を占め、その影響は SH1、SH2、CTR、GT などの各ユニットに及ぶ。また、最も弱点となるのは、護岸の倒壊や滑動といった大規模液状化による護岸被害であり、そのユニットは SH1、SH2 であることが分かる。

表 3.3-1 ボトルネック指標  $BI$  の算出例

ユニット名	コンポーネントの被害要因	影響度	復旧期間の期待値	BI
SH1	大規模液状化による護岸被害	1.000	161.60	161.60
SH2	大規模液状化による護岸被害	0.700	161.60	113.12
PRO1	タワー型ファーンレス震動被害	1.000	91.92	91.92
SS	電気室建屋震動被害	1.000	84.17	84.17
GT	大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80
CRT	大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80
PIPE1	大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80
PRO3	大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80
PIPE5	大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80
PIPE4	大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80
QC	品質管理棟建屋震動被害	1.000	64.22	64.22
PRO1	フレアースタック震動被害	1.000	62.87	62.87
PRO3	フレアースタック震動被害	1.000	61.04	61.04
PIPE6	大規模液状化被害	0.700	80.80	56.56
SH1	栈橋震動被害	1.000	46.55	46.55
CTW	冷却塔震動被害	1.000	45.20	45.20
PRO1	コントロールルーム建屋震動被害	1.000	40.79	40.79
PRO4	大規模液状化被害	0.500	80.80	40.40
PRO1	建屋型ファーンレス震動被害	1.000	36.37	36.37
PRO1	縦置ベッセル・熱交1震動被害	1.000	34.24	34.24
	・	・	・	・
	・	・	・	・
	・	・	・	・

一方、地震発生時においても生産活動や製品の出荷活動を維持するには、各コンポーネントの地震被害を抑止しなければならない。この場合、ボトルネック指標として、各コンポーネントの重要度に、次式で示す機能停止する確率を乗じた指標  $BI_{p_i}$  を用いることもできる。

$$BI_{p_i} = e_i \cdot p_i, \quad i=1 \sim n \quad (3.3-3)$$

ここに、 $p_i$  は、コンポーネント、または被害要因の発生確率であるが、正しくは、当該コンポーネントの機能が停止に至る確率である。

$BI_p$  の算出例を表 3.3-2 に示す。同表では、ユニット CTW の工水供給停止が最弱となっているが、これは事業者外部からの工水の停止であり、事業者が関与できる対策の範囲を超えている。そこで、事業者が対応できる範囲に着目すると、ユニット PRO1 と PRO3 に位置するフレアースタックの震動被害を抑制する対策が効果的である。

表 3.3-2 ボトルネック指標  $BI_p$  の算出例

ユニット名	コンポーネントの被害要因	影響度	機能停止確率	$BI_p$
CTW	工水供給停止	1.000	0.90	0.90
PRO1	フレアースタック震動被害	1.000	0.82	0.82
PRO3	フレアースタック震動被害	1.000	0.82	0.82
PRO1	コントロールルーム建屋天井落下被害	1.000	0.74	0.74
PRO1	タワー型ファーンレス震動被害	1.000	0.74	0.74
QC	品質管理棟建屋天井落下被害	1.000	0.74	0.74
CTW	冷却塔震動被害	1.000	0.67	0.67
PRO1	建屋型ファーンレス震動被害	1.000	0.65	0.65
PIPE3	パイプラック2震動被害	1.000	0.57	0.57
PIPE3	パイプラック1震動被害	1.000	0.57	0.57
PRO1	パイプラック5震動被害	1.000	0.57	0.57
PRO1	パイプラック4震動被害	1.000	0.57	0.57
PRO1	パイプラック3震動被害	1.000	0.57	0.57
PRO1	パイプラック2震動被害	1.000	0.57	0.57
PRO1	パイプラック1震動被害	1.000	0.57	0.57
PRO1	パイプラック10震動被害	1.000	0.57	0.57
PRO1	パイプラック9震動被害	1.000	0.57	0.57
PRO1	パイプラック8震動被害	1.000	0.57	0.57
PRO1	パイプラック7震動被害	1.000	0.57	0.57
PRO1	パイプラック6震動被害	1.000	0.57	0.57
	・	・	・	・
	・	・	・	・
	・	・	・	・

ボトルネック指標  $BI_i$  は、復旧期間、あるいは復旧曲線を効果的に改善するための対策順位を示す指標となる。一方のボトルネック指標  $BI_p$  は、健全度確率や健全度曲線を効果的に改善するための指標になる。どちらかを用いるかは、対策の方針等によって適宜使い分ける必要がある。

なお、システムを構成する要素の弱点を見出す幾つかの方法が、文献 1),2)によって示されている。

#### 参考文献

- 1) 能島暢呂: 要素破壊の相関性を考慮したネットワーク最大フロー評価のシミュレーション, 土木学会論文集 A1, Vol.65, No.1, pp.776-788, 2009.
- 2) Henley, E. J. and Kumamoto, H.: Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice Hall, 1981.

### 3.4 対策と効果の検討

#### 3.4.1 対策選定の目標と方針

対策法を選定するため、目標復旧期間、目標健全確率を満たすようにするか、事業費用の上限など着目すべき項目を明確にする必要がある。

#### 【解説】

地震対策は、「1.4 地震リスクマネジメントの目標と対象機能」で設定した目標にもとづき、検討する。その際、生産活動の再開を優先すべきか、製品出荷を優先すべきか、

危険物の漏洩や火災抑止を優先すべきか、などの方針によって対策のあり方は変わる。また、照査目標を目標復旧期間、あるいは目標健全確率とするか、によっても対策は変わり得る。

事業所の全ての機能を維持することは現実的ではないことを認識し、事業所の経営や社会的責任等を踏まえた企業としての受容限界から、何を護るかといった方針や照査目標を定めると共に、効率的かつ現実的な対策を選定する必要がある。一方で、大規模かつ抜本的な対策が必要な場合には、方針や目標を変える柔軟な対応も必要である。

### 3.4.2 対策事業の効果の検討

対策事業の効果に関係者間で共有するため、対策事業を実施した場合の地震リスクを再評価し、対策の効果に関係者間で確認する。

#### 【解説】

対策事業の効果は、対策事業を実施したと仮定し、復旧期間の期待値や復旧曲線、あるいは健全度曲線を再評価し、現状と比較する。種々の対策事業を実施した場合のフラジリティカーブを評価し、復旧曲線等を再計算する。その際、復旧曲線ならびに健全度曲線は、図 3.4-1、図 3.4-2 で示したハッチング部を通過するように、対策を選定する。

復旧曲線ならびに健全度曲線で見た対策前後の地震リスク評価の比較例を図 3.4-1 および図 3.4-2 に示す。対策事業は、例えば、「3.3 ハード対策の優先順位」で示したボトルネック指標を参考にし、対策の組合せを含めた検討を行う。

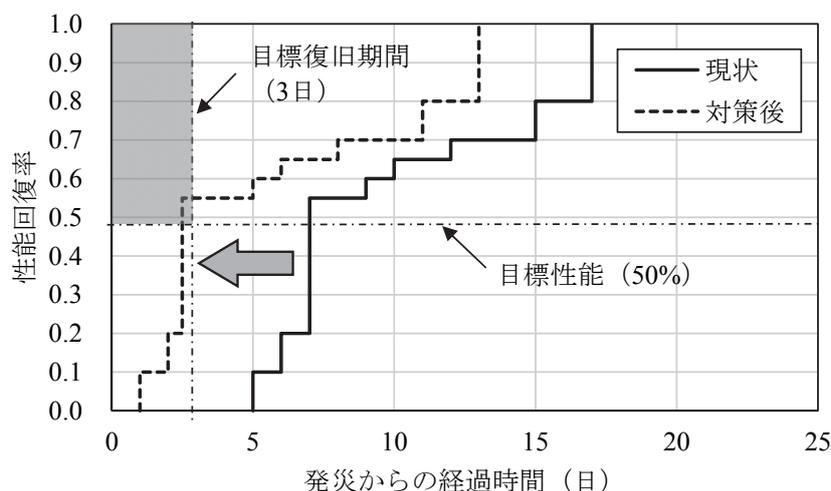


図 3.4-1 復旧曲線で見た対策の効果の比較

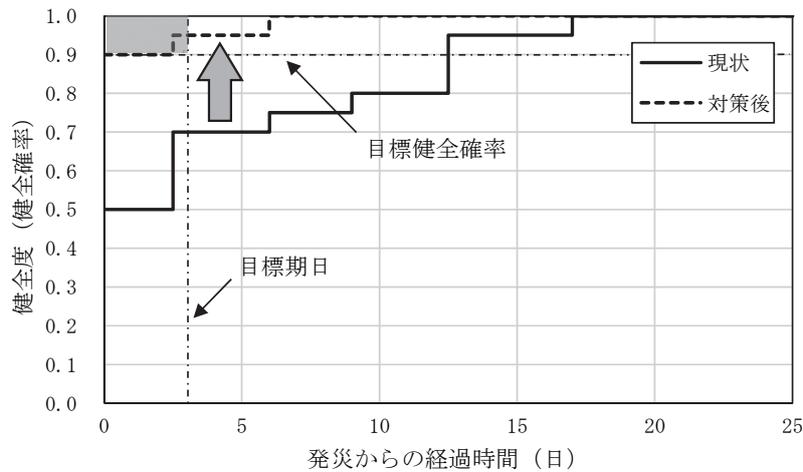


図 3.4-2 健全度曲線で見えた対策の比較

### 3.4.3 対策事業の費用対効果の検討

対策事業を複数用意し、複数の対策事業の費用を算出する。各対策事業による復旧期間の改善効果と費用を比較する。

**【解説】**

複数の対策事業があり、その中で最良案を選択する場合、それぞれの対策事業による費用と復旧期間の改善効果を比較し、費用対効果があり、かつ実現可能な対策事業を関係者間で協議/選定する。図 3.4-3 に、現状を含めた各対策事業による生産停止期間と、各対策事業の概算費用を比較する。

対策案 1 は比較的低価格、対策案 4 は高価格の対策を示している。なお、生産停止期間と製品の出荷停止期間の期待値の計算方法は、「2.7.2 復旧曲線の評価」に示す。

対策費用について、事業者としての対策費用の上限を設定することで、少なくとも対策案 3 と 4 は、実現可能な対策からは除外される。また、事業者としての目標復旧期間を表示することで、これを満たす対策を明確にできる。図より、目標を満たす対策は対策案 3 と 4 となる。ところが、これら対策案は費用面から対象外となっていることから、目標復旧期間に近く、また、費用面で許容できる対策として対策案 2 が選ばれることになる。

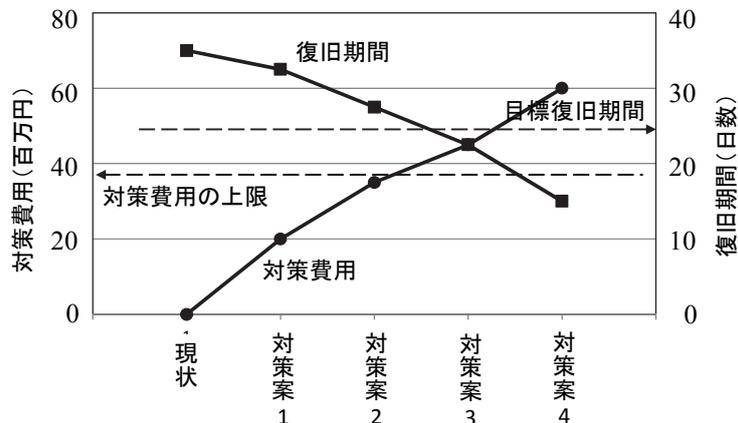


図 3.4-3 復旧期間と対策費用の比較

一方、地震による事業所の物的損失額（復旧費用の期待値）、生産停止による逸失利益等を評価し、これに対策事業の費用を加えた期待総費用を計算し、複数の対策事業を比較することもできる。この場合、期待総費用が最小となる対策を見出すことで、効率的な対策を選び出すことができる。しかし、効率的な対策は、費用的制約や目標復旧期間などから、現実的な対策とはならないこともある。

#### 3.4.4 ライフサイクルコストによる検討

費用対効果は対策を講じた場合の地震リスクの軽減量と対策事業に掛かる費用との比較、すなわちライフサイクルコストの比較により検討される。

##### 【解説】

対策を講じた場合の地震リスクの軽減量は、想定した対策に対して地震リスクを再評価することにより求められる。この軽減量と対策事業に掛かる費用の比較により、費用対効果を検討する。

「3.4.1～3.4.3」では、地震が発生した際に想定される損害に基づき、地震対策の検討方法を述べた。地震の発生確率を考慮した対策の検討方法もある。

事業所の供用期間を設定し、その間に遭遇するであろう地震による損失、いわゆる事業所の物的損失額（復旧費用の期待値）、生産停止による逸失利益を推計し、対策を実施した場合としない場合の損害額と対策費用の累積を、時間軸上で比較する。この方法を、地震ライフサイクルコストと呼ぶ。例を図 3.4-4 に示す。縦軸は、地震リスク（損害額）と地震対策に掛かる費用の和になる。地震リスクは、基本的には地震による損害額を 1 年間に換算し、これを毎年累積して求める。ただし、周期的に発生する地震については、経過年とともに発生確率が変わることを考慮する。

図の例では、対策事業に掛かる費用は 4 億円で、補強対策を実施したケースと、現状のままなにもしないケースを比較している。対策事業を実施すると、地震ライフサイクルコ

ストは 26 年ほどで逆転し、26 年以上供用するのであれば、「対策を実施した方が得」という判断となる。

一方で、地震ライフサイクルコストの評価には課題もある。例えば、1000 年（1 年間で 0.001）に一度程度の稀な地震に対しては、供用期間中に耐震補強実施と現状のままのライフサイクルコストが逆転することは極めて稀となる。これは地震の発生確率が小さいためである。しかし、近年発生した兵庫県南部地震や東日本大震災は、極稀な地震とされていたが、極稀な地震であっても間接的な被害の重大さを含めて検討すると、地震は発生するとの前提に立った判断の方が、利害関係者の合意を得やすいと考える。

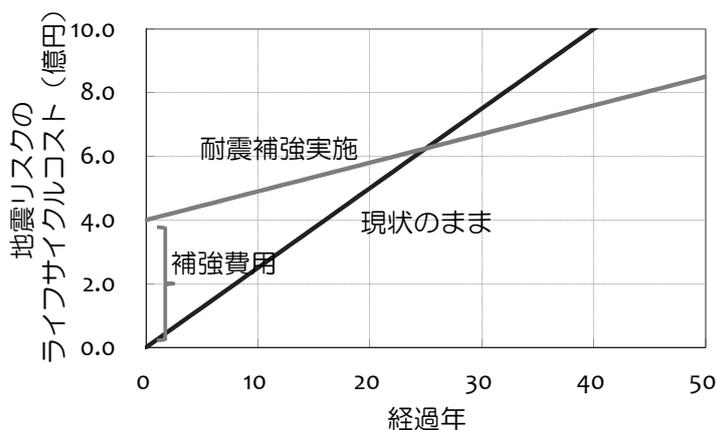


図 3.4-4 地震ライフサイクルコストによる対策事業の効果比較

### 3.5 過去の被害事例に拘らず様々な被害の可能性を考慮する

過去の被害を教訓とし、学習することは重要であるが、類似の被害が自社の事業所で起きるとは限らない。様々な被害の可能性や事業所固有の弱点を客観的に把握する。

#### 【解説】

地震対策を検討すると際、過去の地震被害を見て、このような被害が起きないように対策を実施しようとするケースが多い。同じ被害を繰り返さないために、過去の実被害を教訓とし、学習することは重要である。しかしながら、過去に起きた被害に特化した対策を過剰に行うと、他の重要な対策が置き去りになる可能性がある。事業所の生産停止は、事業所固有の弱点によって引き起され、場合によってはそこが致命的な被害に至るケースがある。過去に発生した類似の被害が、自社の事業所で起きるとは限らないことを認識する必要がある。事業所固有の被害要因や事業所の変容（工場の拡張や生産工程の変更）に応じて発生する被災の様態を客観的に予見し、定量的に把握することが求められる。

地震リスクマネジメントは、確率論的評価を使うことで、様々な被害要因を網羅し、被害の漏れを最小限にする。過去に起きた同様の被害要因も含まれ、また、見逃しがちな被害の要因や弱点を発見できる。

### 3.6 緊急停止基準の検討

緊急停止基準（トリガーレベル）は、緊急停止機能が作動した場合と作動しない場合の地震損失関数を評価し、両者の地震損失関数の交点となる地震動強さを緊急停止基準の基準値とする。

#### 【解説】

緊急停止基準の評価を、イベントツリーを用いて解説する。図3.6-1は、地震動(500cm/sec<sup>2</sup>)が作用した場合を想定して、緊急停止のありとなしを分け、それぞれのケースで、イベントツリーを計算した例である。イベントツリーの各被害要因の確率は、フラジリティカーブから評価する。図3.6-1に示した緊急停止のありとなしの違いは、図中の太字で示した数値である。

まず、緊急停止ありの場合、緊急停止の作動によって延焼の可能性は減少する。本例では、緊急停止なしの場合は延焼確率を0.2、緊急停止ありの場合は0.0としている。また無被害の事業損失は、緊急停止ありの場合のみ、不適切な作動による事業損失10百万円を計上している。無被害であるにも関わらず緊急停止したため、停止期間中の逸失利益等の無駄な費用がかかったことになる。緊急停止なしとありの違いは、基本的にはこの二点である。但し、この他にも緊急停止によって回避される危険事象がある場合には、これを適宜考慮する。

次に、緊急停止なしとありの両ケースにおいて、損失期待値を計算する。本例は地震動(500cm/sec<sup>2</sup>)が作用した場合であり、損失期待値は緊急停止なしで51.4百万円、ありで31.7百万円である。緊急停止ありの方がリスクは小さく、500cm/sec<sup>2</sup>の地震動作用下では、緊急停止の効果はあると判断できる。

地震動を変数として緊急停止なしとありの損失期待値を計算し、地震動を横軸に、損失期待値を縦軸にとり、両者を比較する。これを図3.6-2に示す。図は緊急停止がある場合とない場合の比較で、それぞれの関数を地震損失関数と呼ぶ。図には500cm/sec<sup>2</sup>の地震動作用時の損失期待値を付記している。

ある地震動を境に逆転していることがわかる。逆転している点、いわゆる地震損失関数の交点以下では緊急停止なしの方が損失額は小さく、交点以上では緊急停止ありの方が損失額は小さい。つまり、緊急停止は双方の地震損失関数の交点以上の地震動が作用した場合に、実行すればよいということが分かる。この点が最適な緊急停止基準（トリガーレベル）である。なお、緊急停止ありの地震損失関数が地震動の小さな領域でも0.0にならないのは、微小な地震でも緊急停止が作動し、不適切な作動による損失が生じるからである。

地盤被害 (液状化)	構造被害	出火	延焼	発生確率	損失額 (修復費)	事業損失	期待値	
液状化発生	無被害		未発生 <b>0.8</b>	0.399	0	<b>0</b>	0.0	
			発生 <b>0.2</b>	0.100	100	50	15.0	
	軽微	未出火	未発生 <b>0.8</b>	0.191	5	10	2.9	
			発生 <b>0.2</b>	0.048	100	50	7.2	
			出火	0.060	100	50	9.0	
			未出火	0.119	20	20	4.7	
	中破	未出火	未発生 <b>0.8</b>	0.030	100	50	4.5	
			発生 <b>0.2</b>	0.037	100	50	5.6	
			出火	0.014	100	50	2.1	
			倒壊	0.003	100	50	0.5	
	損失期待値							51.4

(a)緊急停止なし

地盤被害 (液状化)	構造被害	出火	延焼	発生確率	損失額 (修復費)	事業損失	期待値	
液状化発生	無被害		未発生 <b>1.0</b>	0.498	0	<b>10</b>	5.0	
			発生 <b>0.0</b>	0.000	100	50	0.0	
	軽微	未出火	未発生 <b>1.0</b>	0.239	5	10	3.6	
			発生 <b>0.0</b>	0.000	100	50	0.0	
			出火	0.060	100	50	9.0	
			未出火	0.148	20	20	5.9	
	中破	未出火	未発生 <b>1.0</b>	0.000	100	50	0.0	
			発生 <b>0.0</b>	0.037	100	50	5.6	
			出火	0.014	100	50	2.1	
			倒壊	0.003	100	50	0.5	
	損失期待値							31.7

(※損失額、事業損失、期待値、および損失期待値の単位は百万円)

(b)緊急停止あり

図 3.6-1 緊急停止なしとありのイベントツリー (500cm/sec<sup>2</sup> 作用時)

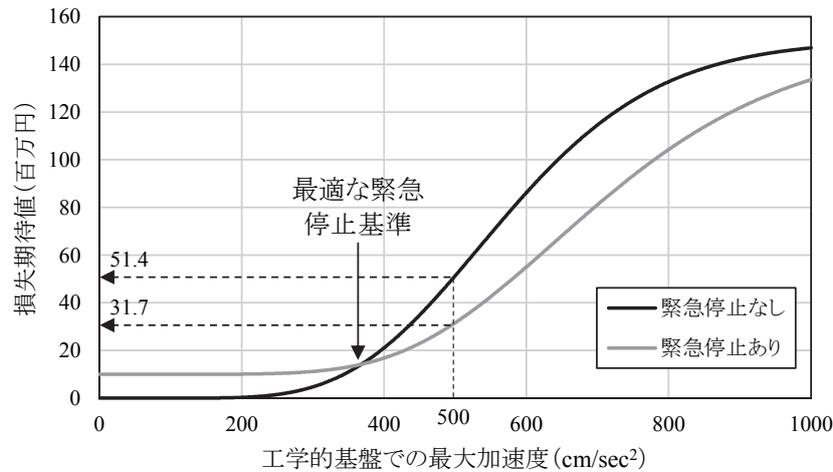


図 3.6-2 緊急停止なしとありの地震損失関数の比較

### 3.7 ICS の導入の検討

地震リスクマネジメントにおいては、事前対応だけでなく、事後対応も含んでいるため、事業者は ICS の導入を検討することも重要である。

**【解説】**

ICS とは、米国で開発された災害現場・事件現場などにおける標準化されたマネジメント・システムのことで指揮命令系統や管理手法を標準化し、組織間連携・地域間連携を可能にするルールである。1970 年代に多発した森林火災の教訓により開発され、徐々に他の行政機関などで利用が拡大し、デファクトスタンダードになった<sup>1)</sup>。

「1.2 地震リスクマネジメントの目的と特徴」などでも述べたように、地震リスクマネジメントは ICS を概念的に包含している。ICS は組織の枠組みを超えて共同で事態にあたる組織横断的な統制の仕組みであるため、その仕組みが実行されれば、より効果的な減災活動が実現する。事業者は本ガイドラインに示す地震リスク評価結果にもとづき、ICS の導入を検討することも重要と考える。

参考文献

- 1) リスク対策.com: 災害から命を守れ ～市民・従業員のためのファーストレスポonder教育～ 第3章 チームの安全を守る ICS, <http://www.risktaisaku.com/sys/series/?p=565>

## 4. 地震リスクマネジメントの運用と利活用

### 4.1 防災は一貫性と継続性を

事業者は、地震リスクマネジメントを効果的に行うため、社会的共通資本としての本質を踏まえて防災の目標や方針を事業所内で周知/共有し、事前防災の考え方のもとに継続性と一貫性を持って進める。

#### 【解説】

石油製品に関する需要と供給は常に変化するため、事業者の事業収支や経営計画も変化する。また、地震被害や防災技術に関する新たな知見も加わるため、事業所の防災目標/方針は、時々に応じて変わる可能性がある。このような変化は、一定程度受け入れざるを得ないが、一貫性を失った対症療法的な対策は避けなければならない。対症療法は、更なる対症療法を招く傾向があり、臨海部コンビナート施設の被災によって生じる企業の事業継続の困難さ、サプライ・チェーン寸断などの産業経済活動の根幹に関わる事態への根本的な対策にはなり得ない。

また、防災担当者が頻繁に変わると目標や方針が変わり、対策の継続性が断たれ、対症療法的な対策が常態化することになる。さらに、防災担当者に十分な権限を与えていない場合、持ち場単位で考え方が異なり、方針を集約できず、必要な対策が取れないケースがある。防災担当者の不十分な権限や頻繁に変わることも、対症療法的な対策を繰り返す原因となり得ることを認識する必要がある。

そのため、コンビナート施設の防災対策は、企業のリスク管理の一環として中長期的な経営計画の中に位置付け、明確な方針/目標を立てるとともに、公共的な性格を持つ社会的共通資本としての本質を全社的に周知/共有し、事前防災の考え方のもとに継続性と一貫性を持って進めていくことが重要である。

### 4.2 隣接する事業者間の広域連携

隣接する事業者、あるいは派生的被害が及ぶと判断される範囲の事業者は、防災目標とともに、地震リスク情報を互いに共有し、地域としての防災対策や派生的二次災害の防止に努める。

臨海部コンビナート施設からの製品供給が停止した場合に、被災地域の背後圏経済活動への影響のみならず、被災地域外へもその影響は波及する。この影響を最小限にするため、同時被災を免れる同業他社間において、製品供給を広域的に補完する体制を構築する。

#### 【解説】

臨海部コンビナート地域には石油精製、石油化学、エネルギー施設など、危険物や高压ガスを扱う事業所が多数隣接している。それぞれの事業所が独自に防災の方針や目標を定めたとしても、コンビナート地域全体としての安全性が担保されるものではない。危険物を扱う事業所が隣接する現状では、一つの装置、一つの工場、あるいは一つの護岸を強靱化しても、コンビナート施設間の延焼や危険物の拡散による港湾機能の停止などの派生的

被害を抑止することはできない。コンビナート地域全体を見据えた安全性の確保が重要になる。

そこで、事業所や工場、道路や港湾施設等のインフラにいたるまで、それぞれの組織、立場で実現可能な防災目標を定め、地震リスク情報とともに、互いに共有することが必要である。さらに国や自治体が、防災の目標を明確に定め、周知することも重要である。防災目標と地震リスク情報を共有することで、相互の違いや課題を発見でき、派生的被害を抑止する事前の対策や、発災時における防消火設備の有効活用など、様々な備えを協同して計画することができるようになる。

これまで、事業所が発信する情報は、「危険物の漏洩に対し〇〇対策を実施しているため、安全である」と言った断定的な表現が大半であった。しかしながら、安全を断言しているため、これ以上の議論は進まず、安全を追求する機会を失っている。地震リスク情報としては、復旧曲線や健全度曲線、緊急停止基準（トリガーレベル）、危険物の漏洩確率、出火確率などがあり、リスク情報をもって事業者間での建設的な議論や、より高度な安全を追求する材料として「見える化」することも企業の社会的評価を高める上で有用である。

臨海部コンビナート施設が被災し、石油製品や素材、エネルギー等の供給が停止すると、被災者の救援や支援に支障を来すのみならず、背後圏経済活動にも甚大な影響を及ぼす。事実、東日本大震災では、被災地域内外を問わず、石油製品や各種エネルギー製品の供給不足が発生し、被災地では復旧を遅らせる要因となり、被災地域外の人々についてはその生活不安を助長する結果となった。これを受け、資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会<sup>り</sup>では、石油製品等のエネルギー製品の安定供給を目標に、企業間、事業所間の広域連携の方針や対策について示している。具体的には、被災地域外からの石油製品等の搬入/配送、あるいは代替生産等を計画的に実施するなどである。そのためには臨海部コンビナート施設の同時被災を考慮した広域被災評価を行い、企業間、事業所間の広域連携の方針や具体的な実施項目を協議する必要がある。

同時被災を考慮した広域被災評価は、マルチイベントモデル（「**2.3.2 地震危険度の設定**」を参照）による地震リスク評価を個々の事業所で行い、これを集約することにより行われる。一例を図 4.2-1 に示す。図は、シナリオ地震による同時被災を考慮した被災地域内外の事業所の復旧曲線を例示している。また、図 4.2-2 は、各事業所の復旧曲線から、発災時の事業所間の連携の在り方を示した例である。図には、被災地域に所在する事業所 A は、被災により背後圏への製品供給が当面出来ないことから、事業所 C から製品を海輸し、荷受後被災地へ供給する、事業所 B は製品を直接被災地へ供給する、などの方策が示されている。

広域災害から市民生活や経済活動を護るには、企業はその規模や業態に関わりなく、物流システムの停止要因とならないために、一定の防災性能を持つ必要がある。また、企業間の垣根を越えた連携についても、経済を支える一員として、真摯に検討する必要がある。地震リスク情報は、その検討材料を「見える化」する上でも効果的である。

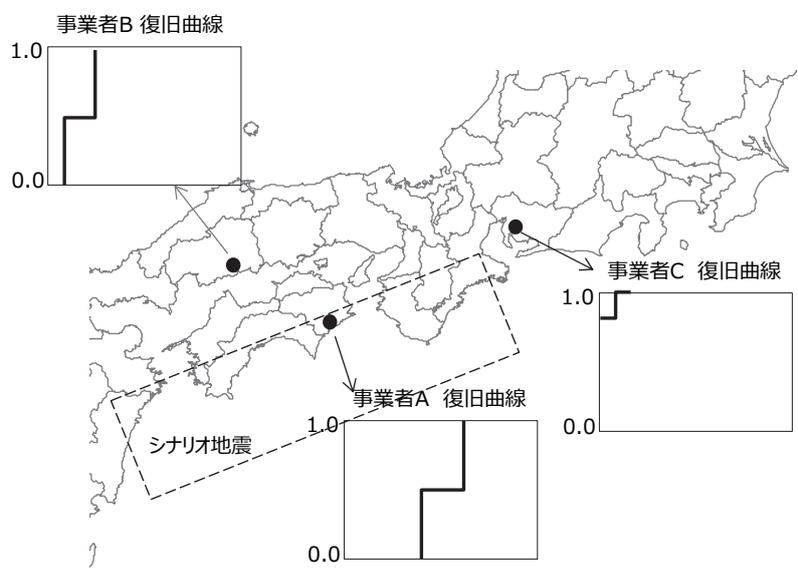


図 4.2-1 シナリオ地震による事業所の復旧曲線の例

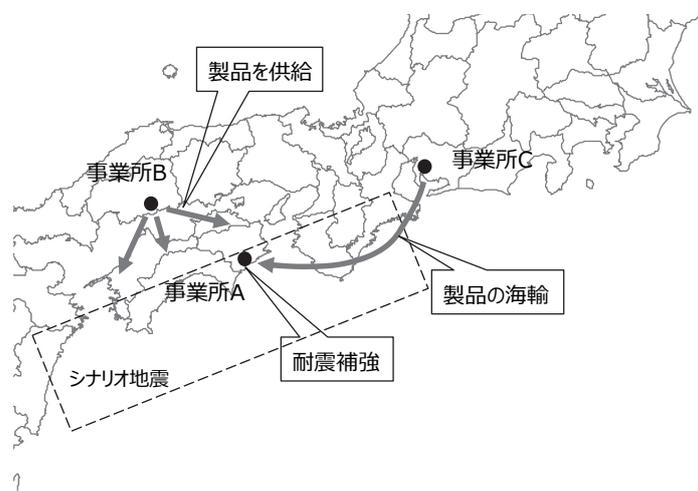


図 4.2-2 シナリオ地震による事業所間広域連携の概念

参考文献

- 1) 資源エネルギー庁: 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会第4回会合 資料2 安定供給確保のための強靱な石油・LPガスサプライチェーンの構築について, 平成25年9月.

### 4.3 地域住民との情報共有とリスクコミュニケーション

事業者は、地域社会や住民に対し防災情報や地震リスク情報を開示する。その際、住民が理解しやすい情報や分かりやすい説明に配慮する。また、日頃から情報開示と説明責任を果たすことにより地域社会や住民とのコミュニケーションを図り、信頼関係を醸成することが重要である。

#### 【解説】

安全と安心は類義語として理解され、日常会話の中では、特に使い分けがなされているわけではない。しかし、安全と安心はかなり違った意味を持ち、これが、地域住民に安全を説明する場面において、説明する側（事業者）と説明を受ける側（地域住民）の議論がかみ合わない原因となっている。安全は、科学的根拠や経済的合理性に基づいた指標や具体的な対策などによって説明されるが、安心は、未知性、恐ろしさ、情報の信憑性、説明者は信頼できるのか、社会的か、など、感性に関わる問題と関連してくる。つまり、科学的根拠や合理性などは、安心を自覚する上で十分な情報とはならず、事業者の安全性の主張は、住民の安心には必ずしも結びつかないことを理解する必要がある。

事業者は、企業の社会的責任や説明責任など社会的評価の重要性を鑑み、日常的に地域社会や住民とコミュニケーションを図り、信頼関係を醸成する必要がある。また、説明の場面では、豊かな専門知識を駆使しつつも、地域社会や住民に対して、誠意ある真摯な態度と言葉で説明責任を果たすことが重要である。

科学技術を背景とした客観的な地震リスク情報は、地域社会や住民の信頼を得る上で必要な要件である。また、「3. 地震リスクマネジメント」で説明した方法は、第三者への説明を容易にすることから、地域社会や住民への説明において効果的に活用できると考えられる。

### 4.4 評価の見直しと改善

#### 4.4.1 事業所の変化による見直し

事業所の製品種や生産量は需要の変動を顕著に受ける。これに伴い、生産工程の改変や製造装置の更新などが行われる。この影響が、事業所の地震リスクの評価結果に影響を与える場合には、地震リスクの再評価を行い、問題点の有無を確認し、リスクマネジメントの見直しを行う。

#### 【解説】

生産工程、製造装置、入出荷設備などは、需要の変動を受け、改変や更新、拡充が行われる。このため、事業所の生産工程や諸設備は、年数の経過と共に変化し、これに伴い耐震性能や被害要因も変わる。地震リスクマネジメントの有効性の低下を防ぐため、必要に応じて地震リスクマネジメントの見直しを行う必要がある。

特に装置の増設や更新による耐震性の向上、生産工程の改変に伴う冗長性の変化など、地震リスクの評価結果に影響を与えたり、何らかの問題点が確認された場合には、地震リ

スクを再評価し、必要に応じて対策の見直しを行う必要がある。

#### 4.4.2 外生要因の変化への対応

臨海部コンビナート施設周辺の社会的環境（人口、土地、施設等）、ライフラインや社会基盤施設、あるいは防災に係る基準/指針などは、情勢の変化や利便性の向上、安全性の向上やシステムの効率化などを目的に更新される。事業者は、これら外生要因が事業所の地震リスクに影響を与えると判断される場合には、地震リスクを再評価するとともに、リスクマネジメントの見直しを行う。

##### 【解説】

人口、土地、施設等の社会的環境、電力、ガス、水道、情報通信等のライフライン、道路や港湾などの社会基盤施設は、情勢の変化や利便性の向上、安全性の向上やシステムの効率化などを目的に更新される。また、公設消防や警察、自衛隊などの防災/減災に係わる組織は、時々々の社会的要請に応じて、組織の更新または改変される。さらに防災に係る基準/指針も変わり得る。事業者は、これら外生要因の変化を地震リスクに反映するため、適宜地震リスクの再評価を行う。改変等によって事業所の地震リスクが著しく増加する場合には、地震リスク情報を材料として、当該組織あるいは団体に対し、リスクの軽減や代替案の提示を含めた交渉を行う。

#### 4.5 地震リスク情報の有効活用と情報プラットフォーム

事業者は、地域の防災/減災に資するため、地震リスクの情報プラットフォームの整備/運用に積極的に関与する。甚大な地震リスクが想定される情報が得られた場合には、事業者は防災/減災に係わる外部の組織とともにリスク軽減策を指摘し合い、改善点を協議する。

##### 【解説】

事業所で造られた製品を消費者へ供給するには、事業所のみならず、道路、港湾施設等の社会基盤施設、物流拠点や小売店、情報通信や電力など、関わりを持つ全ての施設が健全でなければならない。言い換えると、これら全ての施設が、製品供給が滞る要因になり得る。これらの管理主体は、民間企業、自治体、国など異なるため、それぞれの施設の安全性やリスク情報を集約することは難しい。このため、消費者への製品供給の健全性を説明することができない。これは、原材料の入荷についても言える。

そこで、各種事業所やライフライン事業者（電力、水道、ガス通信など）、さらには鉄道や道路、港湾や空港施設等のインフラ、学際的な組織、ICSを担う組織など、民間施設から社会基盤施設などにいたるまで、それぞれの組織、立場で、地震が発生した際に予想される被害や事業停止期間、あるいは復旧曲線を推計し、互いに共有する。つまり、地震リスク情報を共有するためのプラットフォームを整備する。概念図を図4.5-1に示す。

情報プラットフォームには、様々な事業者や施設管理者から地震リスク情報が提供され、データベースとしてストックされる。事業者は必要に応じて、ライフライン、道路や港湾、

他社のリスク情報を見ることができる。

情報プラットフォームが有効に活用されれば、事業者は、原料や製品等の代替輸送経路の検討、代替港の確保、原料や中間品の発注先の地域分散、必要なストック量などを予め準備しておくことができる。また、自家発電を含めた電力確保の方法や、情報通信機能の多重化など、様々な備えを計画することもできる。また、プラットフォームの情報を広域地震被害想定システムと連携することで、住民に対し、より精緻できめ細かな被害想定情報を提供することができるようになる。

情報プラットフォームをベースにして、共有情報を議論できる開かれた場を持つことで、外部の組織などとも互いの依存度や影響範囲を把握でき、さらに耐震性に関する過不足を指摘し合うこともできる。また、情報プラットフォームを介することで、事業者と住民とのリスクコミュニケーションが促進し、災害に対する連帯意識や協同することの重要性を認識でき、防災に関する相互理解や信頼の醸成にも役立つ。

広域災害から経済活動を守るには、事業所や企業、国や自治体が個別に防災対策を検討するのではなく、互助、共助、公助等、互いに連携して、防災・減災対応に努める必要がある。そのためには、社会的共通資本との認識を踏まえて、互いの地震リスク情報を持ち寄り、協同して地域あるいは国全体として事前防災の考え方のもとに防災・減災対策を議論することが必要になる。情報プラットフォームを整備し、地震リスク情報の活用のもとに有効に機能させる必要がある。なお、互助は同業他社との取り組み、共助は異なる分野の組織・機関の連携による取り組み、公助は行政による災害対応である。

情報プラットフォームの整備にあたっては、国や地方自治体を原則とした組織が主体となり、国や自治体の協力の下、事業者の積極的な関与が求められる。一方で、リスク情報の開示は、企業活動にマイナスの影響を与えるとの懸念から、情報開示に積極的な事業者は少ない。しかしながら、リスク情報を開示することで生じるマイナス面より、地域防災への貢献はもとより、企業の社会的評価の向上など、プラスの効果が勝る事実を認識する必要がある。

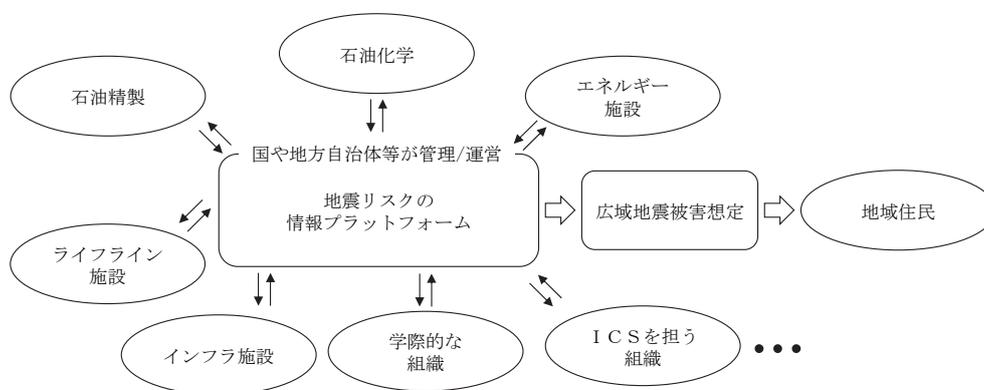


図 4.5-1 地震リスクの情報プラットフォームの概念図

## 付録：技術資料

付録－１ 用語の定義

付表-1 用語の定義

用語	内容
地震危険度	ある対象とする地点で、将来発生が予測されている地震動の強さと、それが発生する頻度（確率）を表したものを地震危険度（地震ハザード）という。地震危険度を表す表現方法として、地震動強さ（加速度や加速度応答スペクトル等）とその年超過確率を表した地震ハザード曲線や、マルチイベントモデルによるイベントハザード曲線等がある。
マルチイベントモデル	複数のシナリオ地震で表現される地震ハザードモデルをマルチイベントモデルという。また、マルチイベントモデルにもとづき、シナリオ地震別の地震動強さ（加速度、速度等）とその年超過確率（各シナリオ地震の発生確率の累積）を表した曲線をマルチイベントモデルによるイベントハザード曲線という。
シナリオ地震	活断層型や海溝型の地震等、特定の名称でその発生が予想されている地震、あるいは震源が特定できないものの、周辺地域で発生が予想される背景地震等をシナリオ地震という。
超過確率	確率変数がある値を超える確率が超過確率であり、年間当たりの超過確率を年超過確率という。
ターゲット地震	マルチイベントモデルでは、数十、数百のシナリオ地震によるリスク評価を行うが、地震によって被害の様態は変わるため、どの地震に対して対策を検討するかを、シナリオ地震の中から選択する。この地震をターゲット地震と呼ぶ。
距離減衰式	距離減衰とは、地震動強さと震源からの距離との関係を示したもので、地震が発生した場所から遠くなればなるほど、地震動強さが減衰する現象のこと。距離減衰式は、地震動強さ（加速度、速度等）と震源からの距離や深さ等との関係を式に表したものである。
液状化指数（ $P_L$ 値）	$P_L$ 値は各土層の液状化強度を深さ方向に重みをつけて足し合わせた値であり、その値が大きい程、ある地点の液状化の可能性が高いことを意味する。
被害要因	地震による被害は、津波による被害、液状化による地盤被害、構造物の損傷、設備機器の損傷といった様々な事象が複合的に発生して生じるものである。このような施設に生じる個々の被害を被害要因という。
ユニット	地震リスクの評価単位の一つであり、離間や機能面等で区画され

	た範囲をユニットという。
コンポーネント	地震リスクの評価単位の一つであり、ユニットの構成要素（構造物）をコンポーネントという。
システムモデル	臨海部コンビナート施設は、種々のユニット（離間や機能面等で区画化された評価単位）やユニットをさらに細かく分類した構成要素（コンポーネント）が連なりシステムとして構成されている。一般的にシステムは、直列型、並列型、あるいはそれらの混合型のモデルに分類される。ユニットやコンポーネントを直列型や並列型等のブロック図として示したものをシステムモデルという。
フラジリティカーブ	地震動強さに従い被害要因の損傷確率を表した曲線をフラジリティカーブという。フラジリティカーブは、構造信頼性理論にもとづき、解析的もしくは統計的に求められる。
複合偏差	種々の不確実性から求められる標準偏差を複合偏差といい、一般的には不確実性をもつ複数の要因の標準偏差の二乗和平方根として算出される。
イベントツリー	被害の進展や連鎖的発生、組合せなどを分析/評価するために、地震の発生を発端事象として被害の発生過程を樹形図で表した図をイベントツリーという。
フォールトツリー	様々な事象の組合せによって生じる故障や機能不全の確率を求めるために、故障や機能不全を頂上事象として、それに関連する従属事象を和事象と積事象の関係で表した樹形図をフォールトツリーという。
復旧曲線	発災からの経過時間に従い、対象施設の性能回復率を示した曲線を復旧曲線という。復旧曲線は、システムモデルにフラジリティ情報（損傷確率や復旧期間等）を与えることで求められる。
健全度曲線	発災からの経過時間に従い、対象施設の健全確率を示した曲線を健全度曲線という。健全度曲線は、復旧曲線と同様に、システムモデルにフラジリティ情報（損傷確率や復旧期間等）を与えることで求められる。
復旧曲線の期待値 (RTE; Recovery Time Expectancy)	復旧曲線から求められる復旧期間の期待値（平均値）を RTE という。
ボトルネック指標 (BI; Bottleneck Index)	施設を構成するコンポーネント毎に求めた復旧期間の期待値に、コンポーネントの重要度を乗じて求めた指標をボトルネック指標という。ボトルネック指標は地震対策の優先度が高い程、大きな値となる。

地震損失関数	地震時に構造物に生じる損失の期待値や90%非超過値を、地震動強さに応じて示した関数を地震損失関数という。
イベントリスクリスト	対象施設に損失を及ぼす上位10~20程度のシナリオ地震、地震の発生確率および累積確率（年超過確率）、また、シナリオ地震による損失（損失額、停止日数）などを表形式のリストで表したものをイベントリスクリストという。
地震保険	地震等による損害を補てんする地震災害専用の保険を地震保険という。一般的に保険の付保範囲は再建費のみである。
キャプティブ保険	親会社のリスクを専門的に引き受けるために当該親会社に所有、管理されている保険会社をキャプティブという。キャプティブは、自家保険によるリスクを内部化することを意味する。
保険デリバティブ	契約締結時に取り決めた条件（一定規模の地震の発生等）が満たされた場合、金融機関から契約締結時に取り決めた金額を受領する金融派生商品をいう。
キャットボンド	企業とSPC（特定目的会社）が契約し、それに基づきSPCが債権（キャットボンド）を発行し資金を集める。リスク顕在時（地震発生時）には、資金の一部または全てを企業に提供する。
リスクスワップ	特定リスク対象をヘッジするために将来発生するようなキャッシュフローを交換する取引のことをスワップといい、現在価値が等しくなるように価格やレートを決定する。
コミットメントライン	予め定めた期間及び融資枠の範囲内で金融機関が融資を実施する仕組みをコミットメントラインという。但し、天災等は免責となる可能性がある。
コンティンジェントデット	特定のリスクに対応する融資枠契約。SPCが融資を実施。コミットメントラインの弱点を克服した仕組み。

## 付録－2 地震リスクの評価例

関西地区に所在する架空の製油所を対象に、地震リスク評価の例を示す。製油所の製品の内、特にガソリンを取上げ、地震による生産停止期間を評価する。リスク情報は復旧曲線とし、加えてボトルネックを把握するための指標を評価する。

### A2.1 リスク評価の対象範囲

#### (1) 対象範囲と工程

関西地区の臨海部に位置する製油所を対象に、同製油所のシナリオ地震時におけるガソリンの製造機能の停止期間（復旧曲線）およびボトルネックを評価した。評価対象範囲は、製油所内の製造設備、移送設備、貯蔵設備、各種ユーティリティ、生産管理・品質管理施設、護岸や棧橋の他、生産に関連する場内ライフライン（電力、工業用水）とした。なお、対象製油所までのライフライン（外部）の供給停止については、当該自治体が公表している地震被害想定結果（ライフライン）を参照し、評価に反映した。

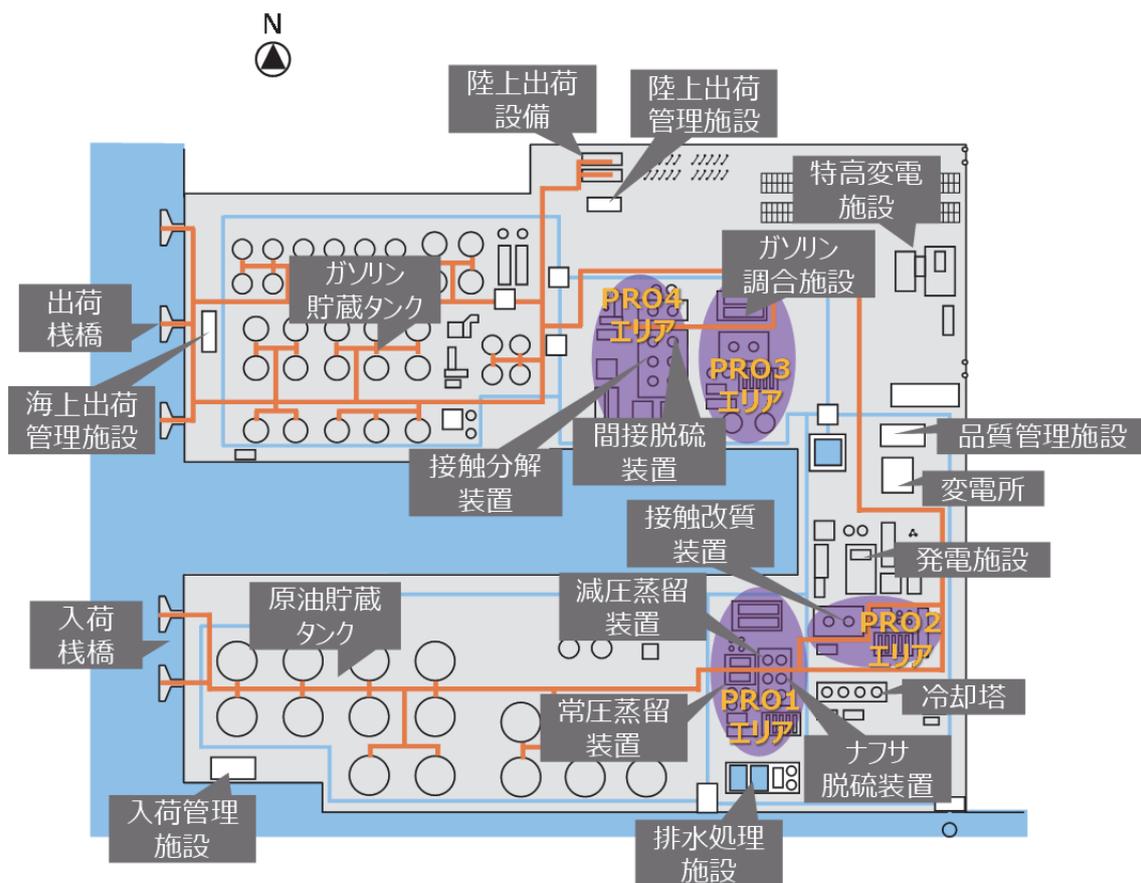
付表 2-1 にリスク評価の全体工程を示す。各項目で要した期間は同表に示すとおりである。キックオフミーティングから数週間後にウォークダウンおよびヒアリングを行い、最終報告まで、半年程度の期間を要した。なお、リスク評価モデルの確認などの協議のため、工程途中で数回の打ち合わせを行った。

付表 2-1 工程表

作業項目	XX月											
	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20
事前の情報収集と整理												
ウォークダウン(目視調査, ヒアリング)												
ハザードの設定												
地震増幅特性, 液状化危険度の評価												
事業中期間評価モデルの構築												
被害形態毎の耐震性能, 復旧期間調査												
コンポーネントの耐震性評価												
地震リスク評価												
対策効果の検討												
取りまとめと報告												

#### (2) 対象施設の概要

対象製油所を概観したものを付図 2-1 に示す。原油は敷地南端の入荷棧橋から移送配管を経由して原油タンクに送られ、これらを原料として製品が製造されている。製造エリアは、4 エリア（PRO1～PRO4）あり、PRO1 に常圧蒸留装置が設置されている。製造プロセスで造られた製品は、移送配管を経由して敷地北側のタンクヤードに貯蔵され、出荷棧橋および陸上出荷設備から各方面へ出荷されている。



付図 2-1 対象製油所概観

## A2.2 ウォークダウンとヒアリング

製品の製造工程や必要なユーティリティなどを把握し、重要および危険な製造装置、消火設備などの設置状況を確認するため、2日間のウォークダウンを各エリア担当者随行のもと行った。1日目は棧橋、原油タンクおよび、PRO1～PRO4の製造プロセスのエリア、製品タンクを、2日目はユーティリティ（発電施設、出荷管理建屋、ポンプ室など）および移送配管を調査し、さらに設備装置、建屋等の設計図書の確認を行った。

ヒアリング調査では、各製品の製造工程や必要なユーティリティを確認した。調査で分かったリスク評価に関わる聞き取り結果を以下に示す。

- ・ 地震発生後に製造エリアやタンクヤード内の 1 装置・設備でも損傷・異常があった場合、そのエリア・ヤード全体の運転や払出を止める。
- ・ 通常は買電による電力を使用している。買電は特高受電施設で受け、変電所で電圧を落として、製油所内の各所へ配電している。また、製油所内の自家発電でも製造のための全電力を賄うことができる。自家発電による電力も変電所を経由する。

- ・ 生産に関わるユーティリティは、主に電力、工業用水（以下、工水）、エアである。動力負荷として電力、冷却負荷として工水（冷却水）が必要となる。なお、加熱用の燃料ガスは各製造エリアで生成されるガスを使用している。
- ・ 製油所内の消火装備では、多点出火には対応できない。1箇所の出火でも出火エリア外への延焼防止が限界である。
- ・ ガソリンの陸上出荷と海上出荷の割合は売上の30%、70%である。
- ・ 事業所の緊急停止基準は、150cm/sec<sup>2</sup>を観測した際に全停としている。その際、諸配管の遮断の動力は電力とエアである。
- ・ その他

製油所各エリアのプロット、製品製造フロー、製造装置およびタンクリスト、重要な製造設備、建屋の設計図書、地盤、栈橋関連の資料が提供された。提供資料を、付表 2-2 に示す。

付表 2-2 提供資料（その1）

■施設プロット

資料（ファイル）名	備考
PRO1 PLOT PLAN 最新版	20XX.XX.XX受領（PDF）
GE PLOT PLAN	20XX.XX.XX受領（PDF）
構内平面図 PLOT最新版	20XX.XX.XX受領（PDF）
PRO2 PLOT PLAN 最新版	20XX.XX.XX受領（PDF）
PRO3 PLOT PLAN 最新版	20XX.XX.XX受領（PDF）
PRO4 PLOT PLAN 最新版	20XX.XX.XX受領（PDF）

■設備装置・建屋リスト

資料（ファイル）名	備考
計器室等施設リスト	20XX.XX.XX受領（EXCEL）
所内装置リスト	20XX.XX.XX受領（EXCEL）
出火危険の高い装置リスト	20XX.XX.XX受領（EXCEL）
タンクリスト	20XX.XX.XX受領（EXCEL）

■ユーティリティ

資料（ファイル）名	備考
所内電力系統図	20XX.XX.XX受領（PDF）
所内工業用水系統図	20XX.XX.XX受領（PDF）
所内排水系統図	20XX.XX.XX受領（PDF）
所内消火栓系統図	20XX.XX.XX受領（PDF）

■製造フロー

資料（ファイル）名	備考
全製品生産フロー図	20XX.XX.XX受領（PDF）

付表 2-2 提供資料（その 2）

■ 建屋	
装置および図書名称、数量	備考
耐震補強報告書 品質管理棟 平成XX年X月	20XX.XX.XX受領 (PDF)
耐震診断報告書 (PRO1計器室) 20XX年XX月実施	20XX.XX.XX受領 (PDF)
耐震診断報告書 (海上出荷管理室) 20XX年XX月実施	20XX.XX.XX受領 (PDF)
■ PRO1	
装置および図書名称、数量	備考
C-XXXX C-XXXX 耐震検討書	20XX.XX.XX受領 (PDF)
F-XXXX F-XXXX 強度計算書 (耐震)	20XX.XX.XX受領 (PDF)
■ PRO2	
装置および図書名称、数量	備考
D-XXXX D-XXXX 耐震検討書	20XX.XX.XX受領 (PDF)
■ PRO4	
装置および図書名称、数量	備考
PRO4 No.1 STRUCTURE 耐震計算書	20XX.XX.XX受領 (PDF)
Z01-09 オンサイトパイプブラック 耐震検討書	20XX.XX.XX受領 (PDF)
■ TANK	
装置および図書名称、数量	備考
原油貯蔵タンク No.XX 安全性評価計算書	20XX.XX.XX受領 (PDF)
ガソリントタンク No.XX 安全性評価計算書	20XX.XX.XX受領 (PDF)
■ その他	
装置および図書名称、数量	備考
C護岸の耐震性評価 報告書 平成XX年XX月XX日	20XX.XX.XX受領 (PDF)
A栈橋の耐震性調査 報告書 平成XX年XX月	20XX.XX.XX受領 (PDF)
製油所内地盤調査報告書 20XX/XX/XX	20XX.XX.XX受領 (PDF)

### A2.3 ハザードの設定

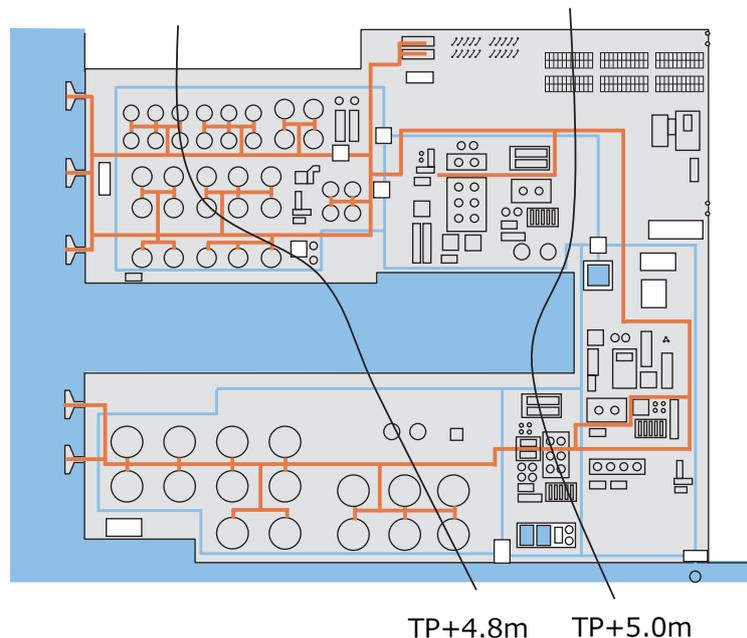
地震危険度は、マルチイベントモデルに基づくシナリオ地震危険度評価手法を用いて評価した。震源情報の詳細を、付表 2-3 に一覧として示す。同表は工学的基盤での最大加速度（PBA; Peak Bedrock Acceleration、以下 PBA）上位 100 の内、上位 10 の全地震と 11 位以下の活断層地震およびプレート境界地震を示したものである。左から順に、震源名、気象庁マグニチュード、PBA、年発生確率、再現期間、今後 30 年間での発生確率、その累積確率を表している。なお、製油所直面での津波高さを最右欄に示した。津波高さは、自治体等から公開されている津波浸水マップ等から引用した。

また、付図 2-2 に対象サイトの標高を示す。対象サイト周辺の護岸の天端高さは提供された構造図面より T.P.+5m 程度であり、対象サイトは護岸天端と同程度の標高である。なお、護岸外の栈橋は T.P.+3m 程度である。つまり、津波被害発生確率評価の閾値は、護岸内のエリアが T.P.+5m、栈橋が T.P.+3m となる。

ターゲット地震としては、地震の発生頻度や関心度などから、2 番の上町断層帯地震 M7.5、26 番の南海トラフ全域地震 M9.0 の 2 地震が適当と考える。

付表 2-3 対象施設に被害を及ぼす地震源の情報

No.	震源名	マグニ チュード	PBA (cm/sec <sup>2</sup> )	年発生確率	再現 期間 (年)	30年 発生確率	累積確率	津波高さ (T.P.+m)
1	(135.45, 34.55)	M7.0	511.8	0.00000302	> 1000	0.00009047	0.00009047	-
2	上町断層帯	M7.5	494.4	0.00098632	> 1000	0.02917592	0.02926374	-
3	(135.35, 34.55)	M7.0	477.0	0.00000302	> 1000	0.00009047	0.02935156	-
4	(135.45, 34.45)	M7.0	464.3	0.00000302	> 1000	0.00009059	0.02943950	-
5	(135.35, 34.45)	M7.0	439.8	0.00000302	> 1000	0.00009059	0.02952742	-
6	(135.55, 34.55)	M7.0	418.0	0.00000302	> 1000	0.00009047	0.02961522	-
7	中央構造線 (和泉山脈)	M7.7	380.9	0.00096795	> 1000	0.02932916	0.05807579	-
8	(135.55, 34.45)	M7.0	379.4	0.00000302	> 1000	0.00009059	0.05816112	-
9	(135.45, 34.65)	M7.0	378.2	0.00000301	> 1000	0.00009036	0.05824622	-
10	(135.35, 34.65)	M7.0	356.4	0.00000301	> 1000	0.00009036	0.05833132	-
	.....							
18	生駒断層帯	M7.5	289.1	0.00000066	> 1000	0.00002272	0.05975980	-
19	六甲・淡路断層帯(六甲南縁)	M7.9	288.6	0.00003907	> 1000	0.00140176	0.06107780	-
20	(135.35, 34.45)	M6.5	287.3	0.00001260	> 1000	0.00037803	0.06143274	-
	.....							
25	和泉北麓断層帯	M6.8	268.8	0.00001515	> 1000	0.00045444	0.06246803	-
26	南海トラフ全域 (M9.0)	M9.0	268.3	0.00019296	> 1000	0.02848756	0.08917603	4.0
	.....							
29	大阪湾断層帯	M7.5	259.6	0.00000106	> 1000	0.00003608	0.08937400	2.5
30	中央構造線 (金剛山地)	M6.9	259.3	0.00006079	> 1000	0.00185571	0.09106385	-
31	羽曳野断層帯	M6.8	252.9	0.00015150	> 1000	0.00453514	0.09518601	-
	.....							
43	中央構造線五条	M7.4	214.2	0.00000667	> 1000	0.00019998	0.09864343	-
	.....							
49	中央構造線 (紀淡-鳴門)	M7.7	203.1	0.00005722	> 1000	0.00178893	0.10225583	-
	.....							
54	有馬-高槻断層帯	M7.5	189.7	0.00000111	> 1000	0.00005360	0.10421928	-
	.....							
65	京阪奈丘陵撓曲帯	M7.1	175.5	0.00010000	> 1000	0.00299550	0.11135893	-
	.....							
71	南海トラフ全域 (M8.6)	M8.6	166.2	0.00019296	> 1000	0.02848756	0.13859258	2.5
	.....							
77	六甲・淡路断層帯(淡路島西岸)	M7.1	157.6	0.00000000	> 1000	0.00000000	0.13988501	-
	.....							
90	奈良盆地東縁断層帯	M7.4	145.0	0.00103250	969	0.03060736	0.17754806	-
91	東海・東南海連動 (M8.4)	M8.4	144.4	0.00025941	> 1000	0.04016522	0.21058202	1.8
92	南海トラフ全域 (M8.4)	M8.4	144.3	0.00019296	> 1000	0.02848756	0.23307061	1.9
	.....							
100	(135.85, 34.45)	M7.0	138.4	0.00000302	> 1000	0.00009059	0.23534232	-



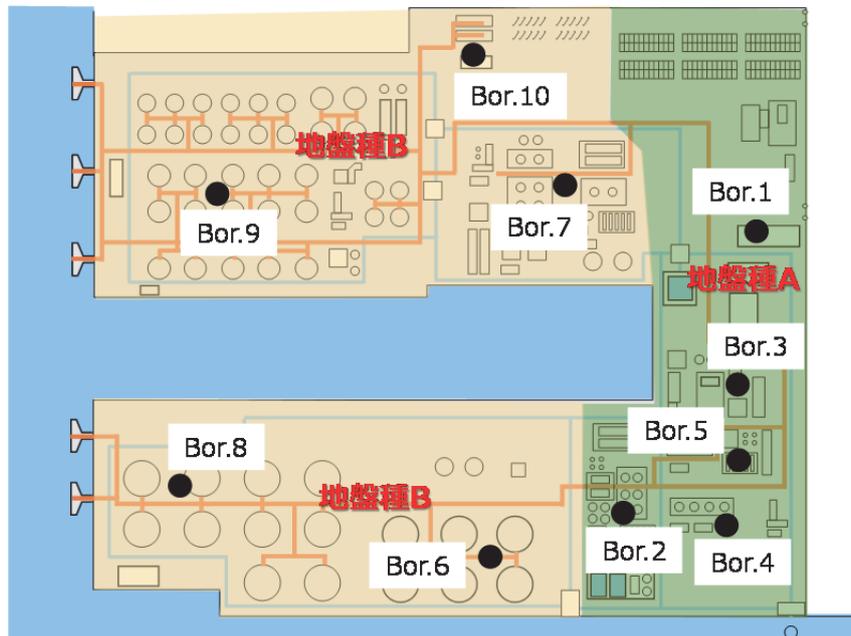
付図 2-2 対象製油所標高

#### A2.4 地盤増幅特性・液状化危険度の評価

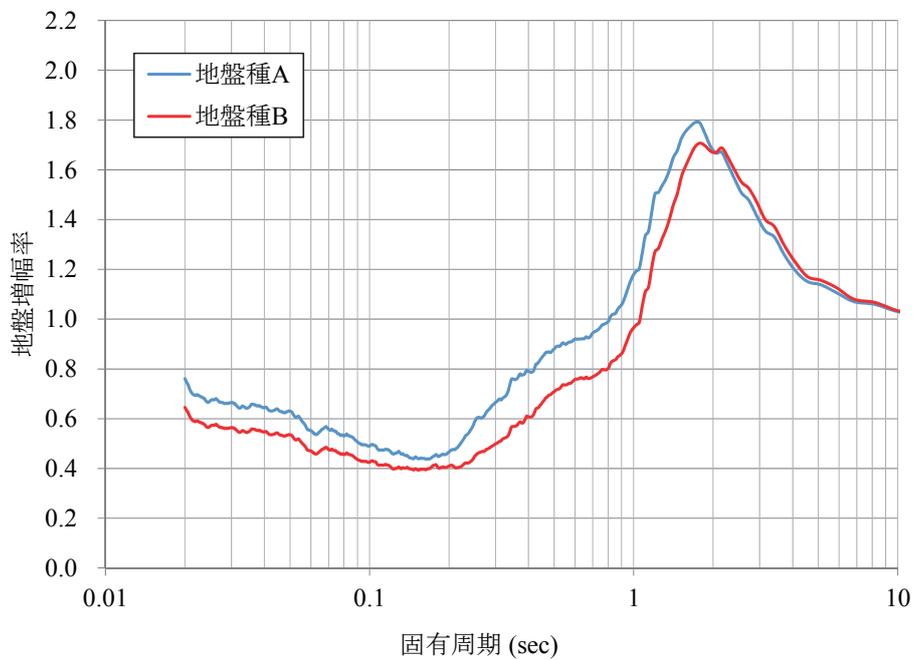
##### (1) 地盤増幅特性

当該敷地は、製油所建設時に埋め立てられた地盤とそうでない地盤に大別される。タンクヤードやPRO3やPRO4の製造プロセスエリア、陸上出荷施設のエリアは埋立地盤である。提供資料では、付図 2-3 に示す対象サイト内の 10 地点で、地表から工学的基盤に至るまでのボーリングデータが示されており、各土質の物性値（密度、せん断波速度）ならびに工学的基盤の深度分布が提供されている。本評価では、工学的基盤から地表面までの地盤をモデル化し、重複反射理論に基づく等価線形化法による次元波動伝搬解析によって地盤増幅率（応答スペクトル比）を算出した。その際の入力地震動の大きさは、最大級の南海トラフ全域地震（付表 2-3 の 26 番目の「南海トラフ全域(M9.0)」）時の最大加速度を参照し、工学的基盤での最大加速度  $268\text{cm/sec}^2$  とした。この加速度レベルに対して、工学的基盤での加速度応答スペクトルに適合する模擬地震波 20 波を作成するとともに、それぞれの地震波について波動伝播解析を行い、増幅率を求めてそれらを平均化した。なお、今回は工学的基盤での最大加速度を  $268\text{cm/sec}^2$  と固定しているが、地震動の大きさに応じた地盤の非線形挙動の影響が顕著な場合は、最大加速度に応じた複数の応答スペクトル比を評価する必要がある。

次に、10 地点での応答スペクトル比の類似性から、場内を A 地盤と B 地盤の 2 種の地盤種に分類した。Bor.1~5 は A 地盤、Bor.6~10 は B 地盤である。付図 2-4 に A 地盤および B 地盤の増幅率を示す。同図の増幅率は、Bor.1~5 の平均および Bor.6~10 の平均である。本評価では、この増幅率の平均値を使用した。



付図 2-3 ボーリング調査位置と地盤種

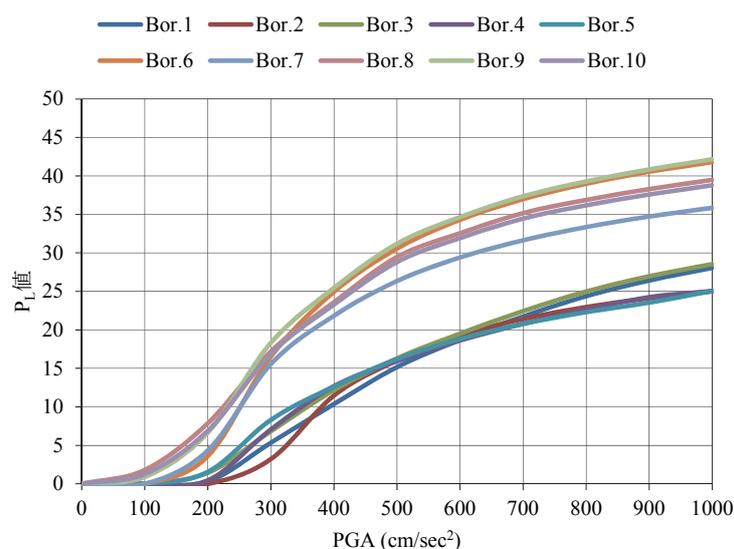


付図 2-4 各地盤種の地盤増幅率 (加速度応答スペクトル比)

## (2) 液状化危険度

液状化による製油所被害は、基本的には地盤変状（沈下，側方流動）に起因している。一方で、大規模な地盤変状を伴わない小規模な液状化では、製造類や各種配管等の被害は殆ど見られないことから、大規模液状化の発生を被害要因とし、その発生する限界の地震動強さを評価する。先ず、地盤増幅特性評価に用いた 10 地点の各土層に対する物性値（N 値、湿潤密度、細粒分含有率、平均粒径等）、および地下水位より、 $P_L$  値を評価した。付図 2-5 に、10 地点の地表面最大加速度（PGA; Peak Ground Acceleration、以下 PGA）の大きさに応じた  $P_L$  値を示す。同図より、Bor.1~5（A 地盤種）、Bor.6~10（B 地盤種）の  $P_L$  値は酷似しており、その平均値を各地盤種の値として代表させる。

次に、 $P_L$  値 20 を大規模液状化発生の限界加速度とし、図より地盤種 A および B の  $P_L$  値 20 相当の PGA を読み取った。地盤種 A は  $640\text{cm/sec}^2$ 、B は  $340\text{cm/sec}^2$  である。地盤増幅特性評価で算出した該当地盤種の最大加速度の増幅率で除することで、PBA に換算する。これを大規模液状化発生の中央値とし、その値を付表 2-4 に示す。



付図 2-5 PGA の大きさに応じた対象敷地の  $P_L$  値

付表 2-4 大規模液状化発生の中央値

地盤種	Boring No.	地盤増幅	液状化耐力( $P_L$ 値20)	
			地表面 ( $\text{cm/sec}^2$ )	基盤 ( $\text{cm/sec}^2$ )
A	1,2,3,4,5	0.76	640	840
B	6,7,8,9,10	0.65	340	530

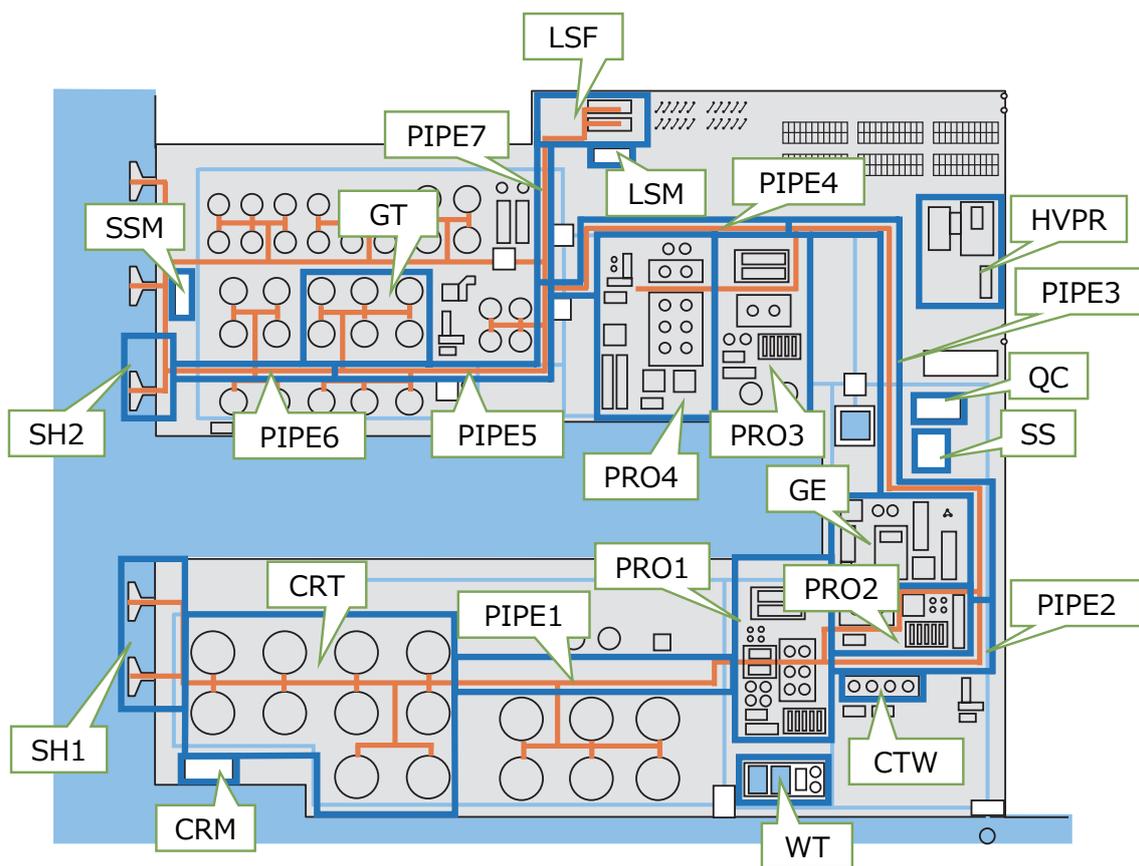
## A2.5 地震リスク評価モデルの作成

### (1) ユニットの分割

リスク評価では離間や機能面で分割される区画をユニットと称し、製油所全体を区画化する。ユニット内には各種の装置や配管、架構などが存在する。これらをコンポーネントと呼ぶ。

まず、ヒアリング調査より、製造プロセスの各ユニット（PRO1～PRO4）内の製造装置が一つでも損傷・異常があった場合は、そのユニットは運転停止するものとした。タンクヤードについても、製造物および内容物の危険性より、1基でも損傷・異常があった場合、そのエリア全体の運転・払出等を止めるものとした。

付図 2-6 に製油所の担当者と協議して設定した計 25 のユニットを示す。製造プロセスおよびタンクヤードはそのエリア全体を、ユーティリティについてはそれらの機能を考慮して設定した。付表 2-5 にはユニット名称と主な設備を示す。



付図 2-6 ユニット化

付表 2-5 ユニットと主な設備

ユニット名	主な設備	ユニット名	主な設備
SH1	入荷栈橋、護岸、移送配管	PIPE3	移送配管
CRT	原油タンク	PIPE4	移送配管
CRM	入荷管理施設	PRO3	製造エリアPRO3
PIPE1	移送配管	PRO4	製造エリアPRO4
PRO1	製造エリアPRO1	PIPE5	移送配管
PRO2	製造エリアPRO2	GT	ガソリントank
WT	排水処理施設	PIPE6	移送配管
CTW	冷却塔	SH2	出荷栈橋、護岸、移送配管
PIPE2	移送配管	SSM	海上出荷管理施設
GE	発電施設	PIPE7	移送配管
SS	変電所	LSF	陸上出荷場、移送配管
QC	品質管理施設	LSM	陸上出荷管理施設
HVPR	特高受電施設		

(2) 物理的被害要因の抽出と復旧期間

被害要因は、コンポーネントレベルで考慮し、特に液状化、震動（揺れ）による被害を考える。付表 2-3 に示す一部のシナリオ地震時については、津波被害も考慮する。付表 2-6 にコンポーネントの被害要因とともに被害形態に応じた復旧期間を示す。

停止期間は被害要因の被害モード毎に与える。まず、建屋と装置類に関わらず、復旧期間の上限を 360 日としている。これは復旧期間が 1 年以上になる場合、経営の主体が変わるほどの状況や信用の失墜、費用調達の問題など、派生的な甚大損失が生じることになり、1 年以上の事業停止の推計自体に意味がないと考えられることによる。建屋類については、建屋が軽微被害でも操業には直接影響しないと考え、軽微被害による復旧期間は 0 日とした。中破、大破、倒壊はそれぞれ 10 日、60 日、360 日とした。一般建築物では、中破、大破の復旧期間は 10 日、60 日より長期になるが、製油所における建屋の役割は運転/監視ならびに計装類の保護にあり、衛生設備や外観などの要素はあまり重要ではないと考えられ、比較的早期に復旧するものとした。

タワー類やタンク類の軽微被害の復旧には 30 日を要するとした。なお、東日本大震災において、鹿島コンビナートに所在する化学工場は、主に津波と液状化に起因した被害を受けたが、プラントの能力の半分を回復するのに 2 か月ほど、完全復旧までに 3 か月ほど要した。被害規模の割には、比較的早期の回復であったと考えられる。このような事例を勘案し、軽微被害の復旧には 30 日と設定した。一方、タワー類の大破被害について、高温の内容物を扱い、自己出火する可能性の高いコンポーネントは 180 日、滞油量が多いものの、直ちに出火するとは限らないコンポーネントは 120 日とした。

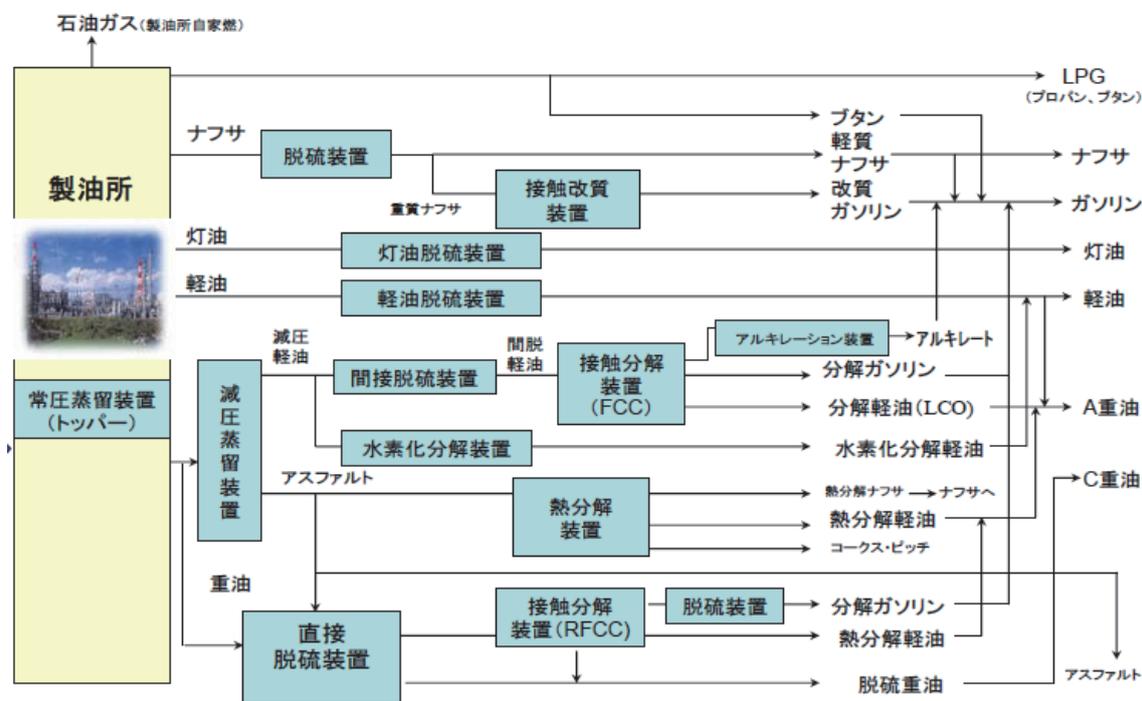
パイプラックについては、比較的早期の復旧が可能であり、軽微、大破、倒壊、それぞれ 10 日、60 日、180 日とした。

付表 2-6 ユニットの被害要因と被害モードに応じた復旧期間

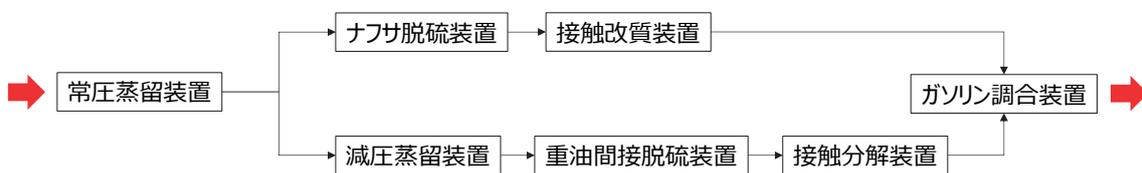
ユニット名	地盤種	被害要因	各被害モードの復旧期間（日）			
			軽微	中破	大破	倒壊 (崩壊)
PRO1	A	液状化被害	—	—	180	—
		タワー（着火） 震動被害	30	—	180	360
		タワー 震動被害	30	—	120	360
		横置ベッセル・熱交 震動被害	30	—	120	360
		縦置ベッセル・熱交 震動被害	30	—	120	360
		タワー型ファーンレス 震動被害	30	—	180	360
		建屋型ファーンレス 震動被害	30	—	180	360
		フレースタック 震動被害	30	—	120	360
		ポンプ・コンプレッサー類 震動被害	10	—	—	60
		パイプラック 震動被害	10	—	60	180
		ストラクチャー 震動被害	30	—	120	360
		コントロールルーム建屋 震動被害	0	10	60	360
		コントロールルーム建屋天井 落下被害	—	—	—	10
コントロールルーム建屋内計装類 震動被害	10	—	—	60		
コントロールルーム建屋内電気設備 震動被害	10	—	—	60		
CRM	B	液状化被害	—	—	180	—
		原油入荷管理室建屋 震動被害	0	10	60	180
		原油入荷管理室建屋天井 落下被害	—	—	—	10
		原油入荷管理室建屋内計装類 震動被害	10	—	—	60
		SS	A	液状化被害	—	—
変電所建屋 震動被害	0	10		60	360	
変電所建屋内電気設備 震動被害	10	—		—	60	
屋外電気設備 震動被害	10	—		—	60	
SSM	B	液状化被害	—	—	—	—
		海上出荷管理建屋 震動被害	0	10	60	360
		海上出荷管理建屋天井 落下被害	—	—	—	10
		海上出荷管理建屋内計装類 震動被害	10	—	—	60
		海上出荷管理建屋内電気設備 震動被害	10	—	—	60
LSM	B	液状化被害	—	—	180	—
		陸上出荷管理建屋 震動被害	0	10	60	180
		陸上出荷管理建屋天井 落下被害	—	—	—	10
		陸上出荷管理建屋建屋内計装類 震動被害	10	—	—	60
LSF	B	液状化被害	—	—	120	—
		陸上出荷施設 震動被害	10	—	60	120
		パイプラック 震動被害	10	—	60	180
GT	B	液状化被害	—	—	180	—
		ガソリンポンプ 震動被害	10	—	—	60
		タンク(45,000KL) 震動被害	30	—	120	360
		タンク(40,000KL-80,000KL未満) 震動被害	—	—	180	—
CRT	B	液状化被害	—	—	180	—
		原油ポンプ 震動被害	10	—	—	60
		原油タンク(8万KL以上) 震動被害	30	—	120	360

(3) 事業停止期間の評価に関するシステムモデル

対象製油所では、原油を常圧蒸留装置で処理し、各製造プロセスのエリアを介して、ガソリン、軽油、灯油、重油、ジェット燃料、アスファルトなどの各種製品を製造している。提供された製品毎の製造フローの概略を付図 2-7(a)に、本評価で対象となるガソリンについてのみ取り出しものを付図 2-7(b)に示す。ガソリンは、主に常圧蒸留装置で分解されたナフサおよび重油から製造される。なお、付図 2-7(a)は、経済産業省の「石油精製に関する基礎資料、総合資源エネルギー調査会石油分科会」<sup>1)</sup>から引用したものである。



(a)製油所の製造フロー<sup>1)</sup>



(b)ガソリンの製造プロセス

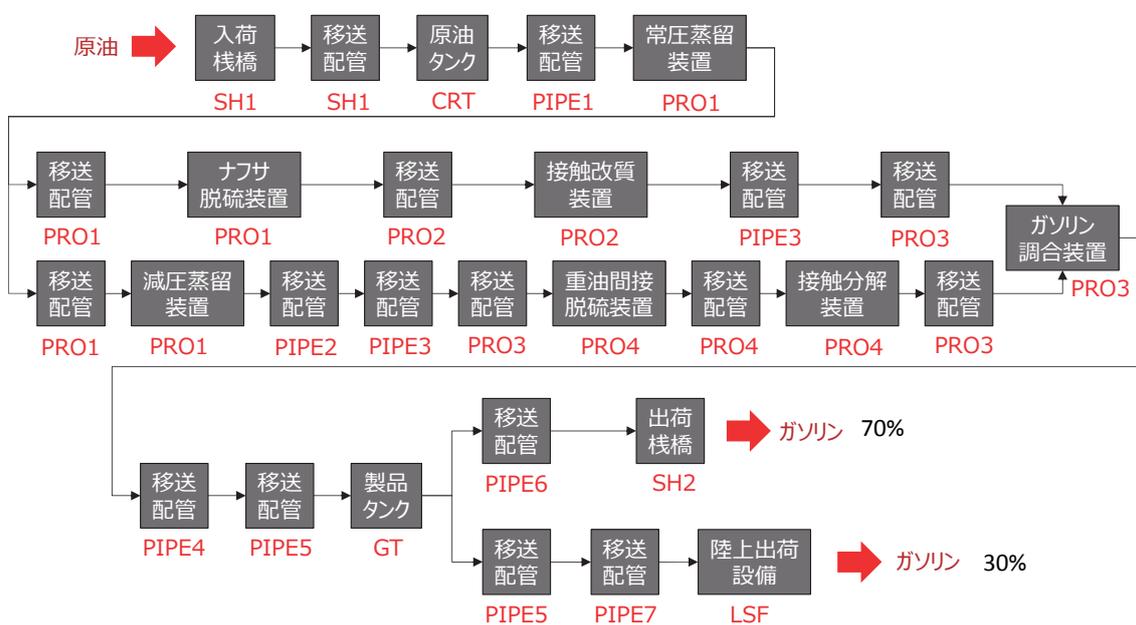
付図 2-7 製油所の製造フローの概略

付図 2-8(a)は、原油としての入荷からガソリンの貯蔵場所、出荷場（海上、陸上）までの移送経路を含めたフローを示す。同フローの白抜き矩形（■）に記載された名称は、当

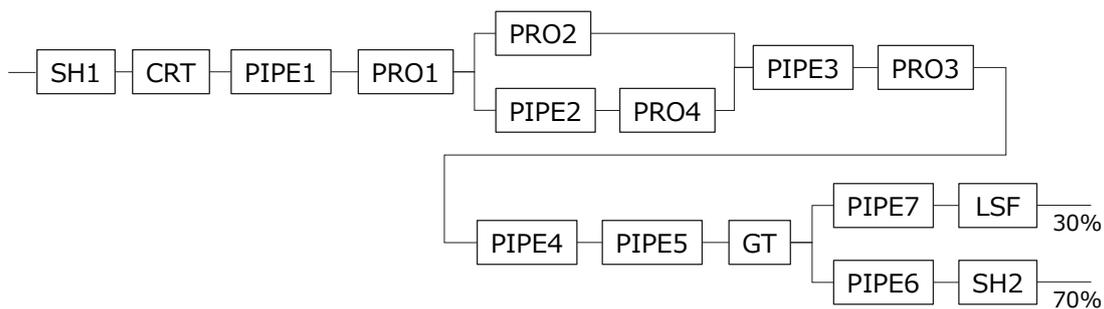
該製油所の主要な施設・設備であり、その下に赤字で当該施設・設備が属するユニット名を付記している。付図 2-8(a)にて、主要施設・設備名で表記されていたフローをユニット表記にして整理し、ガソリンの製造・出荷に関して各ユニットの直列・並列のシステム構成を、モデル化したものを付図 2-8(b)に示す。

ここで、同一のユニット内のコンポーネントが一つでも損傷した場合、同ユニットは停止し、また損傷コンポーネントの内、最長の復旧期間を以ってユニットの復旧期間とする。これより、同一のユニット内のコンポーネントは、システム上直列としてモデル化することができる。これを踏まえ、付図 2-8(a)のフローと(b)のシステムモデルを比較すると、(a)のフローでは、常圧蒸留装置の下流側が並列となって、ナフサ脱硫装置、もしくは減圧蒸留装置へ流れているが、(b)のシステムモデルでは、常圧蒸留装置、ナフサ脱硫装置、減圧蒸留装置ともにユニット PRO1 に所在するため、一つのユニット（PRO1）に集約されている。同様に PRO3、PIPE3 も集約されたユニットとしてモデル化される。このことから、ガソリンの製造・出荷に関しては、ユニット PRO1、PRO3 は生産に欠くことができず、ユニット PIPE3 は移送の際、必ず経由することになる。

また、付図 2-8(a)のフローと(b)のシステムモデルの 30%と 70%は、それぞれ陸上出荷、海上出荷の出荷割合である。



(a)フロー



(b)システムモデル

付図 2-8 原料(原油)入荷から製品(ガソリン)出荷までのフローとシステムモデル

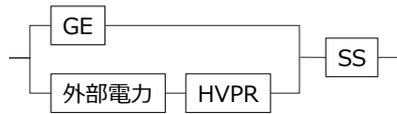
原料や製品の搬入、移送、出荷、管理および製品の生産には動力、加熱、冷却負荷が必要となる。そのためには電力、工業用水、燃料ガス等のユーティリティの供給が不可欠である。ここでは、製品生産および入出荷、移送に必要なユーティリティについて検討し、これをリスク評価用のシステムモデルに反映する。

付図 2-9 に電力負荷に関するフローとシステムモデルを示す。製油所内の各施設・設備の動力は、電力会社からの買電および製油所内の発電施設から得られる電力を使用している。発電施設の発電用ボイラーのタービンは、製油所内の製造エリアで副次的に生産される燃料ガスを使用している。買電は特高受電施設で受け、変電所で電圧を落として、製油所内の各所へ配電している。また、自家発電による電力も変電所を経由する。よって、動力負荷のシステムモデルは、発電施設（ユニット GE）と特高受電施設（ユニット HVPR）のユニットが並列となり、それと変電施設（ユニット SS）が直列に繋がることになる。つまり、ユニット GE とユニット HVPR のいずれかとユニット SS の両方が機能しないと、製油所内でガソリンを製造・出荷するための動力を得ることができない。

自家発電に使われる燃料は、製造工程で造られる複製ガスを用いている。このガスの供給停止時には、各プロセスユニットも機能停止していることから、システムモデルに組み込む必要はない。



(a)フロー



(b)システムモデル

付図 2-9 ユーティリティ（電力負荷）のフローとシステムモデル

付図 2-10 に冷却に関するフローとシステムモデルを示す。製油所内の製造エリアでは、工業用水を引き込み、製油所内の冷却塔（ユニット CTW）で生成された冷却水を主に使用している。つまり外部からの工水と冷却塔が機能しなければならない。敷地内の送水配管はネットワーク状になっており、各プロセスユニット（PRO1～PRO4）には配水可能とし、冷却塔からプロセスユニットへの冷却水の途絶は考えない。



(a)フロー



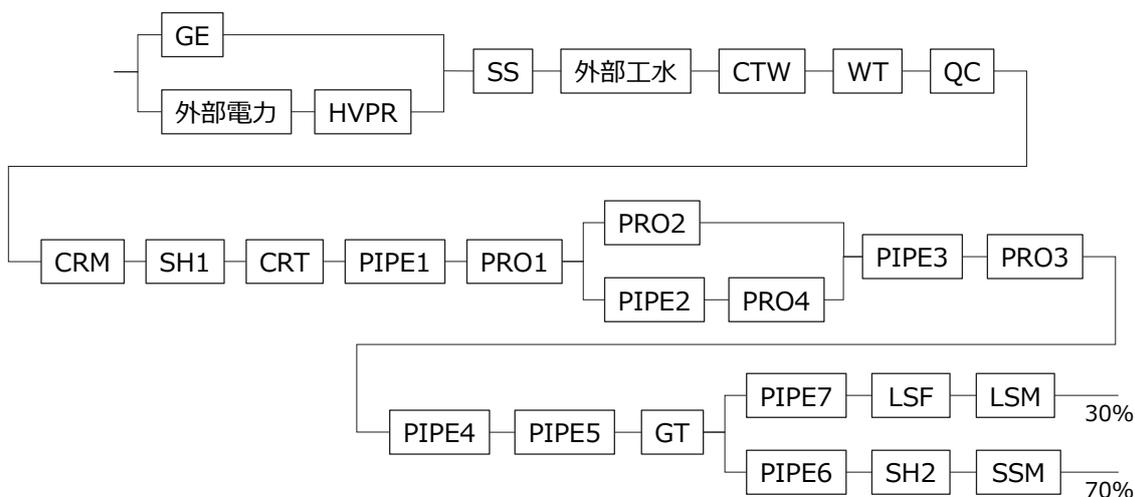
(b)システムモデル

付図 2-10 ユーティリティ（冷却）のフローとシステムモデル

製造工程で必要となる加熱に必要な燃料ガス（ファーネス用）も、各製造エリアで生成される複製ガスを使用している。自家発電の燃料ガスと同様に、同ガス供給停止時には各プロセスユニットも停止すると考えられ、システムモデルに組み込む必要はない。

その他のユーティリティでは、品質管理（ユニット QC）、原油入荷管理施設（ユニット CRM）、排水処理施設（ユニット WT）は、必ず機能しなければならない。また、海上および陸上出荷ではそれらの管理施設（海上出荷 SSM、陸上出荷 LSM）が機能しなければならない。

以上、原料入荷から製品出荷までの経路を含めたシステム、動力、冷却負荷や管理のユーティリティのシステムを直列状に繋いでガソリン製造・出荷のシステムモデルを構築したものを付図 2-11 に示す。同図のシステムモデルは、3 箇所 of 並列部分がある。ユニット GE と HVPR の部分、およびユニット PRO2 と PIPE2、PRO4 の部分はいずれかが健全であればシステムも健全であることから並列構成である。ユニット GT から分岐する海上出荷と陸上出荷の並列部分は、陸上 30%、海上 70%に性能が分かれた並列である。陸上出荷施設（ユニット LSF）や管理施設（ユニット LSM）、移送配管（ユニット PIPE7）が機能しなくても海上出荷の製品分（70%）の機能は確保できるモデルである。



付図 2-11 ガソリン製造のシステムモデル

## A2.6 フラジリティカーブの評価

### (1) 震動被害・液状化被害

A2.5 (2) で抽出したユニットを構成する各コンポーネントの震動被害の発生確率を評価するため、各コンポーネントの耐震性能を検討した。各コンポーネントの耐震性能は、軽微、大破、倒壊などの状況に至る応答加速度を評価する。リスク評価では、この応答加速度値を PBA に換算し、この値を中央値（耐力中央値）とし、ばらつき（対数標準偏差）を与えて、PBA を地震動指標としたフラジリティカーブを評価する。なお、正確には PBA は工学的解放基盤面での値である。

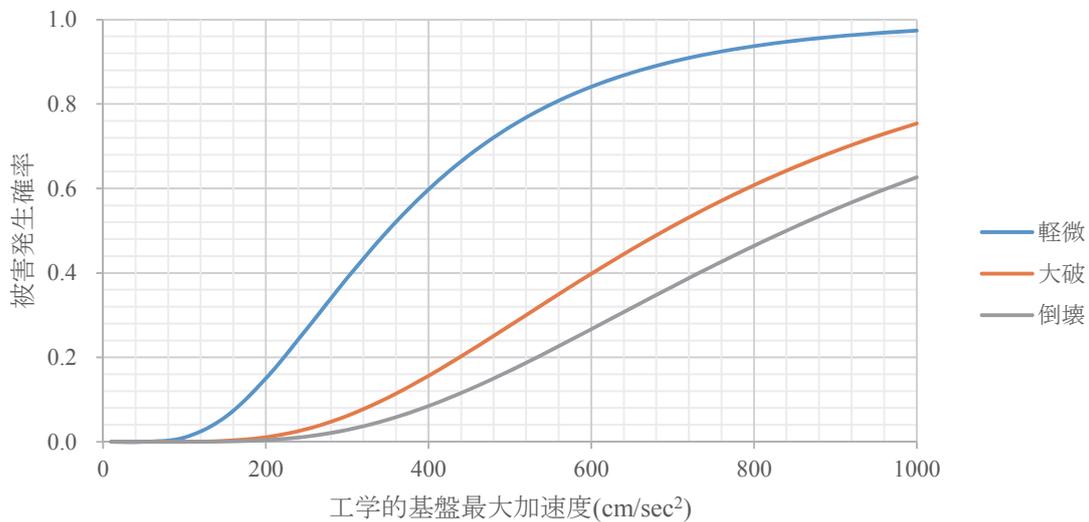
コンポーネントの耐震性能の評価は、耐震計算書や耐震診断書の提供があったタワー2基、円筒形タンク（原油、ガソリン）2基、縦置ベッセル・熱交、パイプラック、ストラクチャー、建屋3棟（コントロールルーム建屋、品質管理棟建屋、出荷管理建屋）について行った。評価結果を付表 2-7 に示す。表の左から、被害要因（液状化被害、あるいは各コンポーネントの震動被害）、固有周期、さらに被害形態（軽微、大破、倒壊など）に対応した応答加速度の耐力が示されている。その右に、応答加速度値を工学的基盤最大加速度に換算するための倍率係数が示されているが、これは地盤増幅、応答倍率、減衰補正、吊設備倍率の4つに分かれる。地盤増幅は、コンポーネントの固有周期に対応した加速度応答スペクトル比（付図 2-4 に示す地盤増幅率）である。応答倍率は、固有周期に対応した工学的基盤面での基準化加速度応答スペクトル値になる。本評価では、告示スペクトルを用い、同スペクトルを最大加速度値で基準化した値を基準化加速度応答スペクトル値として用いた。減衰補正は、コンポーネントの持つ減衰の補正係数である。吊設備倍率は、取り付け部分に対する吊設備の応答倍率である。

付表 2-7 コンポーネントの各被害モードに応じた耐力中央値

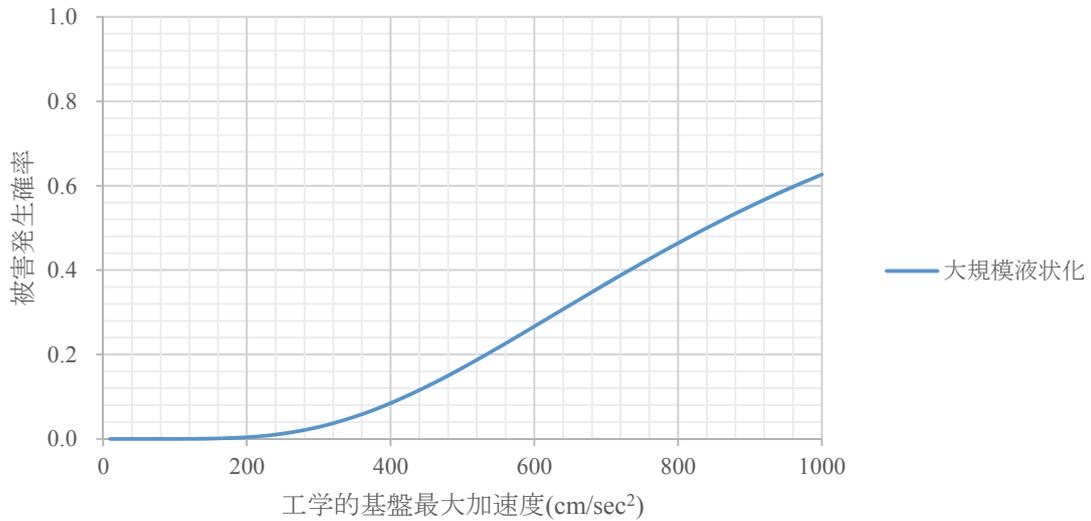
ユニット名	地盤種	被害要因	固有周期 (sec)	各被害モードの 応答加速度の耐力中央値 (cm/sec <sup>2</sup> )				応答係数				各被害モードの 工学的基盤最大加速度に 換算した耐力中央値 (cm/sec <sup>2</sup> )			
				軽微	中破	大破	倒壊 (崩壊)	地盤 増幅	応答 倍率	減衰 補正	吊設備 倍率	軽微	中破	大破	倒壊 (崩壊)
PRO1 A		液状化被害	—	—	—	610	—	0.76	1.00	1.00	1.00	—	—	800	—
		タワー（着火）震動被害	0.80	1000	—	2100	2700	0.99	1.63	1.18	1.00	520	—	1100	1410
		タワー 震動被害	0.80	1000	—	2100	2700	0.99	1.63	1.18	1.00	520	—	1100	1410
		横置ベッセル・熱交 震動被害	0.10	700	—	1400	1770	0.49	1.69	0.89	1.00	950	—	1900	2400
		縦置ベッセル・熱交 震動被害	0.35	1000	—	2080	2650	0.76	2.25	1.18	1.00	500	—	1030	1310
		タワー型ファーンレス 震動被害	0.35	700	—	1400	1700	0.76	2.25	1.18	1.00	350	—	690	840
		建屋型ファーンレス 震動被害	0.65	700	—	1860	2500	0.92	1.91	1.00	1.00	400	—	1050	1420
		フレアスタック 震動被害	2.00	450	—	1150	1600	1.70	0.75	1.18	1.00	300	—	760	1060
		ポンプ・コンプレッサー類 震動被害	0.00	650	—	—	970	0.76	1.00	1.00	1.00	850	—	—	1270
		パイプラック 震動被害	0.25	700	—	2600	3450	0.59	2.25	1.18	1.00	450	—	1660	2200
		ストラクチャー 震動被害	0.50	1100	—	2650	3350	0.88	2.25	1.18	1.00	470	—	1130	1430
		コントロールルーム建屋 震動被害	0.40	450	900	1350	1850	0.79	2.25	1.00	1.00	250	510	760	1040
		コントロールルーム建屋天井 落下被害	0.40	—	—	—	750	0.79	2.25	1.00	1.20	—	—	—	350
		コントロールルーム建屋内計装類 震動被害	0.00	430	—	—	650	0.76	1.00	1.00	1.00	570	—	—	850
		コントロールルーム建屋内電気設備 震動被害	0.00	650	—	—	970	0.76	1.00	1.00	1.00	850	—	—	1270

各被害形態に応じた応答加速度値を前記した 4 種の応答係数（地盤増幅、応答倍率、減衰補正、吊設備倍率）でそれぞれ除すことで、工学的基盤最大加速度値に換算される。工学的基盤最大加速度値換算された耐力中央値は、表の右側に示している。

付図 2-12 にユニット PRO1 のタワー型ファーンレスの震動被害に関するフラジリティカーブ、付図 2-13 に同ユニットの液状化被害に関するフラジリティカーブを示す。フラジリティカーブのばらつきは双方ともに対数標準偏差で 0.54 としている。



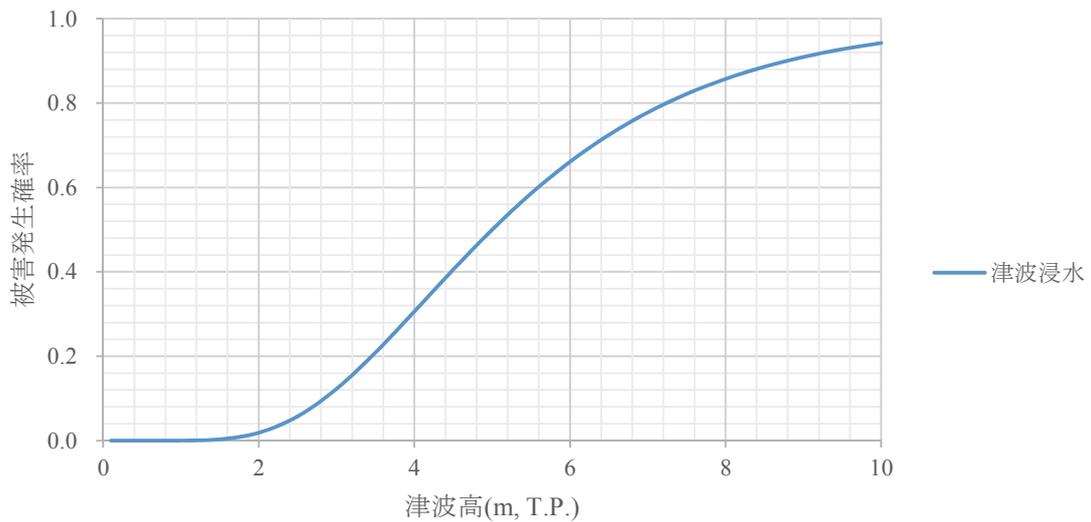
付図 2-12 ユニット PRO1 のタワー型ファーンレスの震動被害のフラジリティカーブ



付図 2-13 ユニット PRO1 (地盤種 A) の大規模液状化被害のフラジリティカーブ

(2) 津波被害

津波による製油所敷地内の浸水被害発生の中値は、栈橋 (ユニット SH1、SH2) が津波高さ T.P.+3m、護岸内のエリア (SH1、SH2 以外のユニット) が T.P.+5m である。付図 2-14 に護岸内のエリアの津波浸水被害に関するフラジリティカーブを示す。フラジリティカーブのばらつきは対数標準偏差で 0.44 としている。



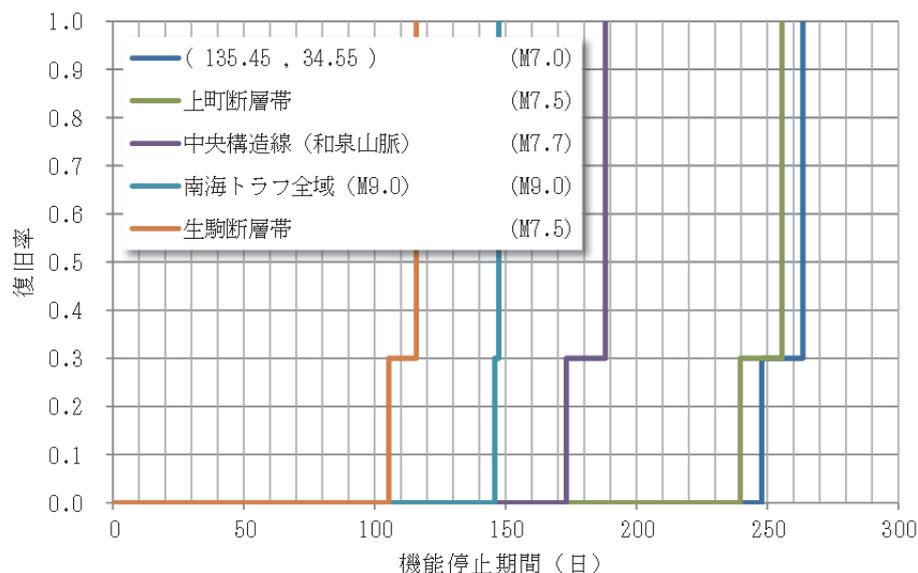
付図 2-14 護岸内のエリアの津波浸水被害のフラジリティカーブ

## A2.7 評価結果

評価結果として、シナリオ地震毎の事業停止期間を列記したイベントリスクリスト（付表 2-8）を示す。また、5つのシナリオ地震を取上げ、その地震による復旧曲線（付図 2-15）を示す。付図 2-15 より、陸上出荷が先に復旧し、海上出荷はその後となっている。これは液状化による護岸被害（護岸の倒れ込み）の影響が相対的に大きいことによる。

付表 2-8 イベントリスクリスト

No.	シナリオ地震 震源名	マグニ チュード	年発生確率	累積 確率	停止日数 平均値	Target Flag
1	( 135.45 , 34.55 )	M7.0	0.00000	0.00000	258.839	1
2	上町断層帯	M7.5	0.00099	0.00099	250.809	1
3	( 135.35 , 34.55 )	M7.0	0.00000	0.00099	242.185	
4	( 135.45 , 34.45 )	M7.0	0.00000	0.00100	235.489	
5	( 135.35 , 34.45 )	M7.0	0.00000	0.00100	221.736	
6	( 135.55 , 34.55 )	M7.0	0.00000	0.00100	208.472	
7	中央構造線 (和泉山脈)	M7.7	0.00097	0.00197	183.640	1
8	( 135.55 , 34.45 )	M7.0	0.00000	0.00197	182.636	
9	( 135.45 , 34.65 )	M7.0	0.00000	0.00197	181.784	
10	( 135.35 , 34.65 )	M7.0	0.00000	0.00198	165.840	
11	( 135.45 , 34.55 )	M6.5	0.00001	0.00199	160.138	
12	( 135.25 , 34.55 )	M7.0	0.00000	0.00199	158.782	
13	南海トラフ全域 (M9.0)	M9.0	0.00019	0.00219	146.920	1
14	( 135.35 , 34.55 )	M6.5	0.00001	0.00220	142.495	
15	( 135.25 , 34.45 )	M7.0	0.00000	0.00220	138.623	
16	( 135.55 , 34.65 )	M7.0	0.00000	0.00220	135.236	
17	( 135.45 , 34.45 )	M6.5	0.00001	0.00222	132.011	
18	( 135.45 , 34.35 )	M7.0	0.00000	0.00222	121.364	
19	生駒断層帯	M7.5	0.00000	0.00222	112.776	1
20	六甲・淡路断層帯(六甲南縁)	M7.9	0.00004	0.00226	112.360	1



付図 2-15 5つのシナリオ地震による復旧曲線

付表 2-9 に、上町断層(M7.5)と南海トラフ全域(M9.0)地震をターゲット地震として、そのボトルネック指標を示す。ボトルネック指標は、事業停止に影響を与える被害要因を抽出するための指標であり、表中の影響度は生産に係る比率、脆弱性は復旧期間期待値である。双方を乗じたものがボトルネック指標である。指標より、上町断層(M7.5)においては液状化による護岸被害やファーンエスの震動被害が高い。また、南海トラフ全域(M9.0)地震では、津波による被害が卓越していることが分かる。

双方のボトルネック指標から、どの地震をターゲットとして考えるか、これによって耐震化対策のあり方や方法が変わってくる。地震リスクマネジメントでは、どのような地震に備えるか、いわゆるターゲット地震を明確にし、目標とする復旧期間等を事前に整えておく必要がある。

付表 2-9 ターゲット地震のボトルネック指標  
(a)上町断層帯(M7.5)地震

上町断層帯 (M7.5)		影響度	脆弱性	BI
損傷要因				
地震名	上町断層帯 (M7.5)			
SH1 大規模液状化（護岸倒込）被害	1.000	161.60	161.60	
SH2 大規模液状化（護岸倒込）被害	0.700	161.60	113.12	
PRO1 タワー型ファーンエス震動被害	1.000	91.92	91.92	
SS 電気室建屋震動被害	1.000	84.17	84.17	
GT 大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80	
CRT 大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80	
PIPE1 大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80	
PRO3 大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80	
PIPE5 大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80	
PIPE4 大規模液状化被害	1.000	80.80	80.80	
QC 品質管理棟建屋震動被害	1.000	64.22	64.22	
PRO1 フレアースタック震動被害	1.000	62.87	62.87	
PRO3 フレアースタック震動被害	1.000	61.04	61.04	
PIPE6 大規模液状化被害	0.700	80.80	56.56	
SH1 棧橋震動被害	1.000	46.55	46.55	
CTW 冷却塔震動被害	1.000	45.20	45.20	
PRO1 コントロールルーム建屋震動被害	1.000	40.79	40.79	
PRO4 大規模液状化被害	0.500	80.80	40.40	
PRO1 建屋型ファーンエス震動被害	1.000	36.37	36.37	
PRO1 縦置ベッセル・熱交1震動被害	1.000	34.24	34.24	

## (b)南海トラフ全域(M9.0)地震

南海トラフ全域 (M9.0) (M9.0)

損傷要因	影響度	脆弱性	BI
地震名	南海トラフ全域 (M9.0)	(M9.0)	
PRO3 津波被害	1.000	111.24	111.24
PRO1 津波被害	1.000	111.24	111.24
QC 津波被害	1.000	111.24	111.24
CRT 津波被害	1.000	111.24	111.24
GT 津波被害	1.000	111.24	111.24
WT 津波被害	1.000	111.24	111.24
CTW 津波被害	1.000	111.24	111.24
CRM 津波被害	1.000	111.24	111.24
SS 津波被害	1.000	55.62	55.62
PRO2 津波被害	0.500	111.24	55.62
HVPR 津波被害	0.500	111.24	55.62
GE 津波被害	0.500	111.24	55.62
PRO4 津波被害	0.500	111.24	55.62
SH1 津波被害	1.000	44.41	44.41
SSM 津波被害	0.700	55.62	38.94
SH1 大規模液状化（護岸倒込）被害	1.000	37.45	37.45
LSF 津波被害	0.300	111.24	33.37
SH2 津波被害	0.700	44.41	31.09
SH2 大規模液状化（護岸倒込）被害	0.700	37.45	26.22
CRT 大規模液状化被害	1.000	18.73	18.73

## 参考文献

- 1) 経済産業省：石油精製に関する基礎資料，総合資源エネルギー調査会石油分科会（第8回）  
-配付資料（参考資料3-1），2010.

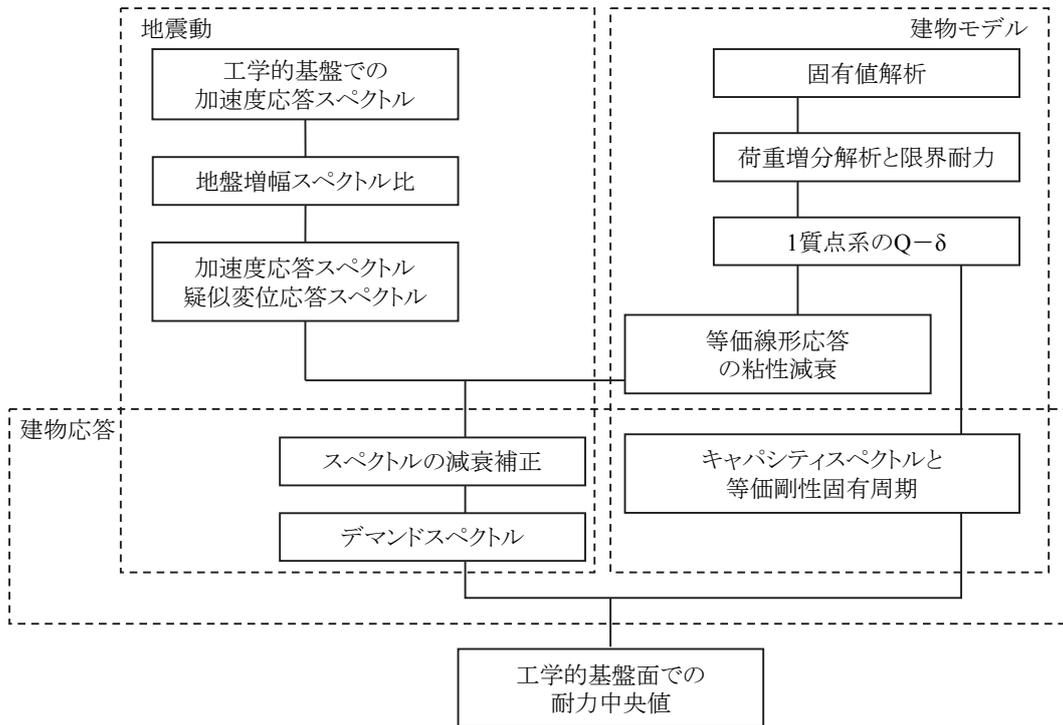
### 付録－3 耐力中央値の評価方法

耐力中央値の評価方法には種々のものがあるが、ここでは地震リスク評価での実用性を考え、応答スペクトル法による方法を説明する。

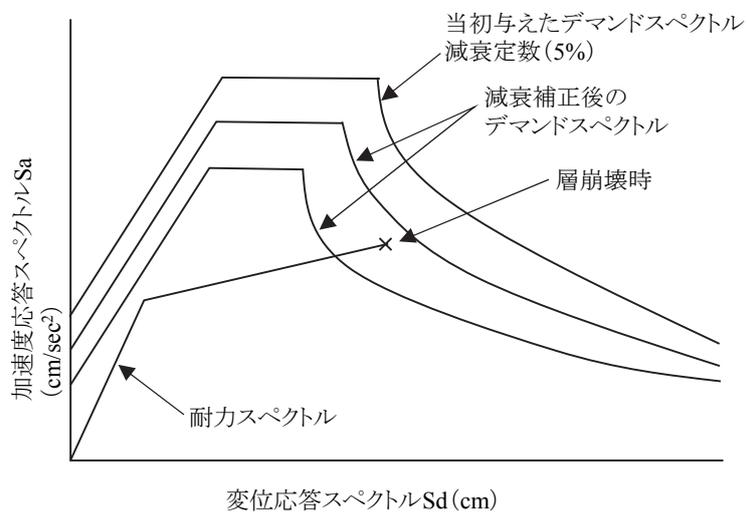
地震動が大きくなると、建物は弾性限界を超え塑性変形へと移行するが、応答スペクトル法は、基本的には弾性変形が前提であり、塑性変形する部材や建物の応答を直接評価することはできない。そこで、塑性変形を伴う応答を等価な弾性応答に置き換える作業が必要となる。具体的には耐力スペクトル法、限界状態設計、さらに細かい手法ではエネルギー一定則、等価剛性等がある。ここでは一例として耐力スペクトル法を概説する。

付図 3-1 に耐力スペクトル法のフロー図を示す。まず、固有値解析ならびに各階の被害形態（軽微，中破，大破，倒壊等）の限界耐力を設定する。荷重増分解析を行い、これを等価な 1 質点系に置き換え、各被害形態と 1 質点系の  $Q-\delta$  を対応させる。1 質点系をバイリニア、トリリニア等適宜モデル化を行い、等価線形応答の固有周期、ならびに粘性減衰（履歴減衰）を求める。さらに、これを耐力スペクトルに変換する。この時点で、各層の被害形態の発生限界を耐力スペクトル上に落とし込むことができ、これらに対応する固有周期、粘性減衰を得ることができる。

次に、付図 3-2 に示すように予め設定した加速度応答スペクトルを減衰補正し、デマンドスペクトルを求める。耐力スペクトルとデマンドスペクトルにより、各被害形態に対応する工学的基盤面での耐力中央値を求める。



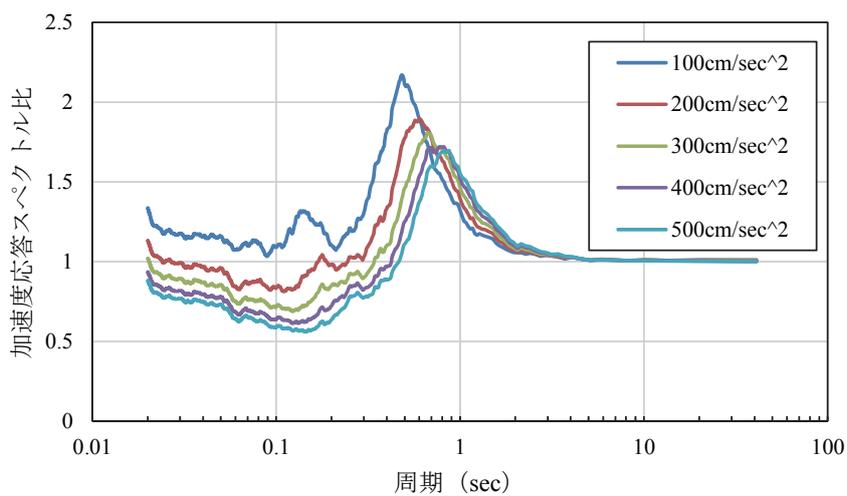
付図 3-1 耐カスペクトル法のフロー



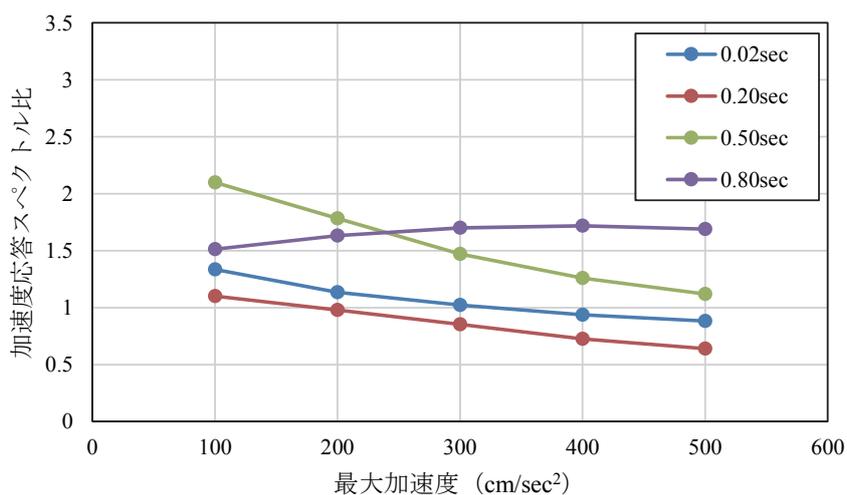
付図 3-2 耐力スペクトルとデマンドスペクトル

#### 付録-4 地盤の非線形性を考慮した損傷確率の評価

付図 4-1 に示すのは、工学的基盤最大加速度（以下 PBA）を  $100\text{cm/sec}^2$  から  $500\text{cm/sec}^2$  まで変化させ、地盤の加速度応答スペクトル比を計算した例である。付図 4-2 は周期  $0.02\text{sec}$  から  $0.8\text{sec}$  のスペクトル比を、基盤最大加速度に応じて示した図である。図より、 $0.8\text{sec}$  を除き、地震動が大きくなるに従い、スペクトル比は低下する傾向が読み取れる。特に周期  $0.5\text{sec}$  以下の周期の低下傾向は顕著である。

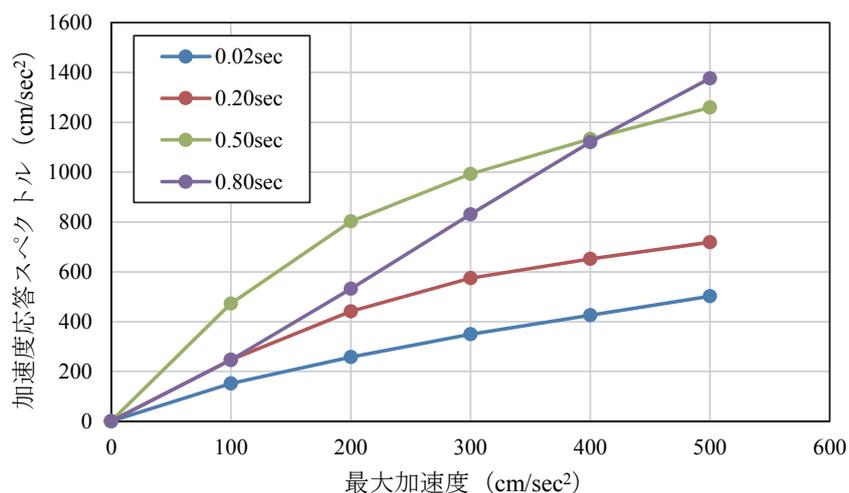


付図 4-1 加速度応答スペクトル比



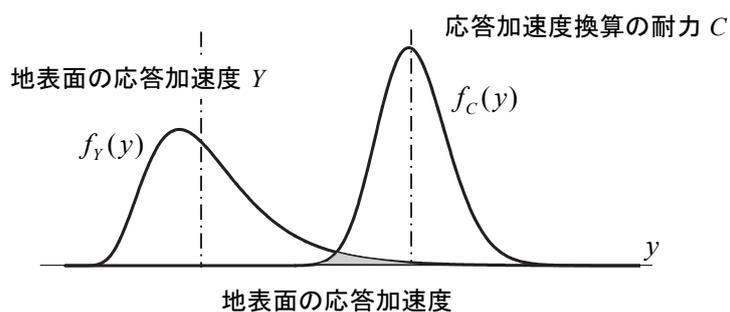
付図 4-2 周期  $0.02\text{sec}$  から  $0.8\text{sec}$  のスペクトル比を基盤最大加速度に対して示した図

次に、周期 0.02sec から 0.8sec を取上げ、PBA に対する加速度応答スペクトル値を示したのが付図 4-3 である。0.8sec を除いた周期では、PBA に対する非線形の傾向が顕著である。ここでは、地震動に依存した地盤の非線形応答倍率を考慮した構造物の損傷確率の評価方法を解説する。



付図 4-3 0.02sec から 0.8sec を取上げ、PBA に対する  
加速度応答スペクトル値を示した図

構造物の損傷確率は、付図 4-4 に示す様に地表面での応答加速度を指標に評価する。図を参照し、損傷確率は以下のように表すことができる。



付図 4-4 地表面での応答加速度を指標とした損傷確率評価の概念図

$$p_f = \int_0^{\infty} F_C(y) \cdot f_Y(y) dy \quad (\text{付 4-1})$$

ここに、 $y$  は地表面での応答加速度、 $f_Y(y)$  は応答加速度の確率密度関数である。また、 $F_C(y)$

は地表面の応答加速度に換算した耐力の確率関数（非超過確率関数）である。

地盤の非線形性を考慮する際、地表面の加速度応答スペクトル値は、それぞれ PBA に依存するものとする。

PBA を確率変数  $X$  で表し、確率密度関数  $f_X(x)$  と置く。任意の周期の地表面応答加速度値  $y$  との関係関数  $y=g(x)$  と置くと、地表面の応答加速度の確率密度関数  $f_Y(y)$  は、確率変数の関数より、以下のように表される。

$$f_Y(y) = f_X(g^{-1}) \left| \frac{dg^{-1}}{dy} \right| \quad (\text{付 4-2})$$

(付 4-2)式より、逆関数  $g^{-1}$  とその微分が必要である。

(付 4-2)式を(付 4-1)式に代入すると、損傷確率は以下のように求めることができる。

$$p_f = \int_0^{\infty} F_c(y) \cdot f_X(g^{-1}) \left| \frac{dg^{-1}}{dy} \right| dy \quad (\text{付 4-3})$$

最初に、地盤の応答倍率が PBA に対して一定（線形）の場合を想起する。関数を  $y=ax$  とする。逆関数と微分値は以下となる。ここで、 $a$  は PBA に対する周期応答倍率と同周期の地盤増幅率が含まれるので注意する。

$$g^{-1}(x) = \frac{y}{a}, \quad \frac{dx}{dy} = \frac{1}{a} \quad (\text{付 4-4})$$

ここで、 $f_X(x)$  を以下のように対数正規分布と仮定する。

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_X x} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - \ln x_m}{\zeta_X} \right)^2 \right] \quad (\text{付 4-5})$$

ここに、 $x_m$  は PBA の中央値、 $\zeta_X$  は対数標準偏差である。(付 4-4)式を(付 4-5)式に代入する。

$$f_Y(y) = f_X(g^{-1}) \left| \frac{dg^{-1}}{dy} \right| = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_X \frac{y}{a}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln y - \ln a - \ln x_m}{\zeta_X} \right)^2 \right] \frac{1}{a}$$

$$f_Y(y) = f_X(g^{-1}) \left| \frac{dg^{-1}}{dy} \right| = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_X y} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln y - \ln(a \cdot x_m)}{\zeta_X} \right)^2 \right] \quad (\text{付 4-6})$$

地盤の応答倍率が PBA に対して一定の場合（線形）、地表面での応答加速度の密度関数  $f_Y(y)$  は、PBA の中央値  $x_m$  を  $a$  倍した中央値を用いればよい。

一方、非線形のケースとして、周期応答倍率を含めた表層地盤での加速度が工学的基盤面での最大加速度に対して、関数  $y=ax^b$  で記述されると仮定する。逆関数と微分値は以下となる。

$$g^{-1}(x) = \left( \frac{y}{a} \right)^{1/b} = \left( \frac{1}{a} \right)^{1/b} \cdot y^{1/b}, \quad \frac{dx}{dy} = \left( \frac{1}{a} \right)^{1/b} \cdot \frac{1}{b} y^{1/b-1} \quad (\text{付 4-7})$$

(付 4-7)式を(付 4-2)式に代入する。

$$f_Y(y) = f_X(g^{-1}) \left| \frac{dg^{-1}}{dy} \right| = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_X y^{1/b}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\frac{1}{b} \ln \left( \frac{y}{a} \right) - \ln(x_m)}{\zeta_X} \right)^2 \right] \frac{1}{b} y^{1/b-1} \quad (\text{付 4-8})$$

(付 4-8)式は、地盤の非線形性を考慮した地表面の応答加速度の密度関数である。これを(付 4-1)式に適用すれば、地盤の非線形応答を考慮した損傷確率が得られる。

この方法では、 $f_Y(y)$  は任意の密度関数となるため、数値積分によって計算しなければならない。その際、積分範囲は  $0 \sim \infty$  となるため、加速度の大きい領域での  $y$  の値には十分注意する。また、物理的には、加速度の大きい領域では、地盤破壊が生じているものと推察されることから、このような現象を含めた積分に意味があるのか、という疑問もある。

そこで、一定の精度を確保しつつ積分の煩雑さを回避する方法として、PBA の中央値  $x_m$  作用時の地盤増幅率を一定として扱うこともできる。この場合にはフラジリティカーブ（対数正規分布の累積確率関数）を適用でき、以下のように求められる。

$$F_Z(x_m) = \int_0^{x_m} f_X \left( \ln x \mid \ln(c_m / ax_m^{b-1}), \sqrt{\zeta_X^2 + \zeta_C^2} \right) dx \quad (\text{付 4-9})$$

(付 4-9)式は、近似であり、地盤増幅率の非線形性によっては、真値との乖離があることを認識する必要がある。

## 付録－5 超過確率の積分による平均値

確率分布の平均値の計算は、一般的には確率密度関数の積分により、次式のように表される。

$$E(X) = \mu_X = \int_0^{\infty} x \cdot f_X(x) dx \quad (\text{付 5-1})$$

一方で、対象とする確率分布が  $0 \sim \infty$  に分布する場合（例えば対数正規分布など）、以下のよう  
に、超過確率関数の積分によって求めることもできる。

$$E(X) = \int_0^{\infty} x \cdot f_X(x) dx = \int_0^{\infty} G_X(x) dx \quad (\text{付 5-2})$$

これは、以下のように証明できる。

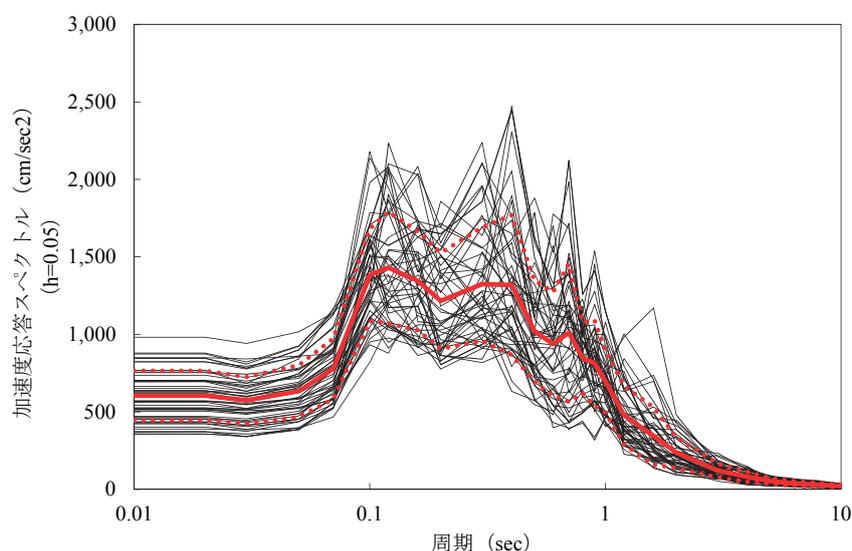
$$\begin{aligned} E(X) &= \int_0^{\infty} x \cdot f_X(x) dx \\ &= [x \cdot F_X(x)]_0^{\infty} - \int_0^{\infty} F_X(x) dx \\ &= \infty - \int_0^{\infty} (1 - G_X(x)) dx \\ &= \infty - [x]_0^{\infty} + \int_0^{\infty} G_X(x) dx \\ &= \int_0^{\infty} G_X(x) dx \end{aligned} \quad (\text{付 5-3})$$

確率変数の MAX, MIN 演算は、超過、非超過確率関数の積によって求めることができる。  
このため、超過確率関数の積分による平均値は、確率密度関数を用いない分、簡便である。  
ただし、対象となる確率分布は、 $0 \sim \infty$  に分布する場合に限るので注意する。

## 付録-6 地震リスク評価におけるサンプルアプローチと応答スペクトル法

南海トラフの巨大海溝型地震や首都直下地震等、発生の逼迫性が指摘されている特定地震に対し、対象地点での地震波を推計（強震動予測）し、その地震波を使い構造物の安全性の検討が行われるケースがある。地震リスク評価では、特定地震による地震波を使った検討結果は、母集団の中の一サンプルに過ぎないと解釈する。地震リスク評価では、母集団の特性値（平均値や標準偏差等）や確率分布特性を求めることを目標とする。

Green 関数法や FEM 等を使った強震動予測が行われている。この場合、震源の破壊過程やアスペリティ等、断層のパラメタの設定によっては、観測点での地震波形は多様となる。付図 6-1 に示すのは、文献 1)による評価結果の一例であり、小断層のすべり分布/アスペリティ/応力降下量等のパラメタを変化させた際に観測される地震波形の加速度応答スペクトルである。



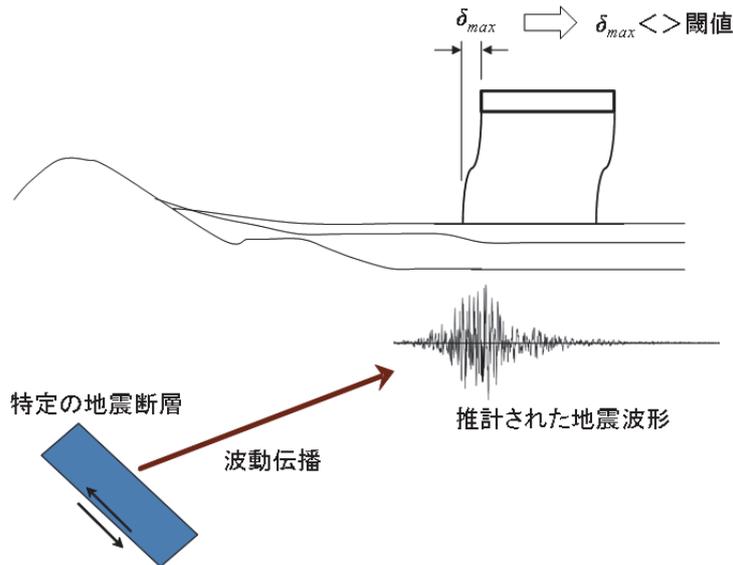
付図 6-1 特定地震による観測点での加速度応答スペクトル  
(経験的/統計的 Green 関数法のハイブリットによる)<sup>1)</sup>

図中の太実線は各周期における応答加速度の平均値を結んだもので、点線は $\pm\sigma$ （標準偏差）を示している。最大加速度（図の 0.01sec）では、 $373\text{cm/sec}^2 \sim 981\text{cm/sec}^2$ の幅があり、その差はおよそ  $600\text{cm/sec}^2$ になる。震源を特定した強震動予測では、パラメタの設定如何によって観測点での地震動に、大きな違いがある。

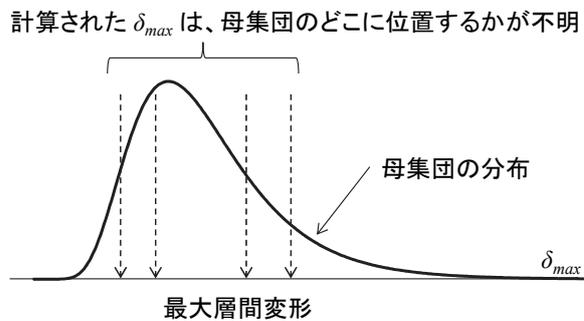
一方、代表的な地震波による時刻歴応答解析を実施し、安全性の検討を行う場合、最大の層間変位  $\delta_{\max}$  等（付図 6-2 参照）を求め、 $\delta_{\max}$  が一定の閾値を超えた場合は、軽微や大破などの被害が発生すると判断する。しかしながら、断層パラメタの設定によって地震波形は多様となるため、震源を特定し、その代表的な地震波を推計し、構造物の時刻歴解析を実施しても、軽微や大破などの被害が発生するとは断言できないことになる。前述の説明にあるように、計算された結果は、母集団の一つにすぎないからである。

### A6.1 最大層間変位の母集団

地震リスク評価は、付図 6-3 に示すように、計算された  $\delta_{max}$  は特定の地震源による最大層間変位のサンプルの一つと解釈する。また、母集団そのものが不明であるため、計算された最大層間変位が、母集団（確率分布）のどこに位置するかは不明となる。地震リスク評価では、最大層間変位の母集団の確率分布を求めることを優先する。

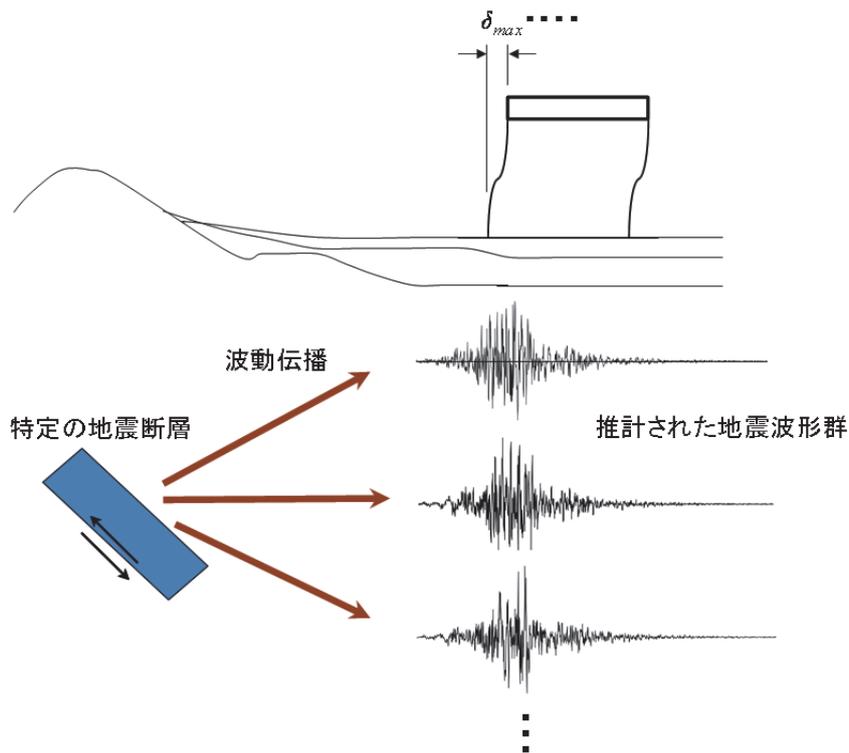


付図 6-2 一つのサンプル地震波による最大層間変形の計算

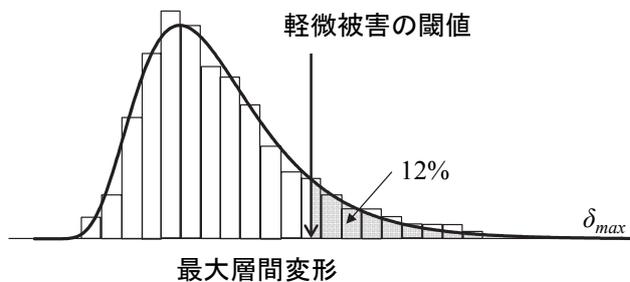


付図 6-3 特定の地震による最大層間変形の確率分布とサンプル

母集団を求めるには、付図 6-4 に示すように、震源パラメタによって異なる地震波形を多数推計する。そして、地震波毎に計算された層間変位の最大値  $\delta_{max}$  を、付図 6-5 に示す様なヒストグラムで表記し、特定地震による最大層間変形の母集団の確率分布（例えば対数正規分布）を特定する。母集団の確率分布に、例えば軽微被害が発生する閾値を付記すれば、これを超える確率として、例えば 12%と読むことができる。つまり、特定地震が発生した際の軽微被害の発生は 12%であり、蓋然的に評価できたことになる。



付図 6-4 多数のサンプル地震波による最大層間変形の計算

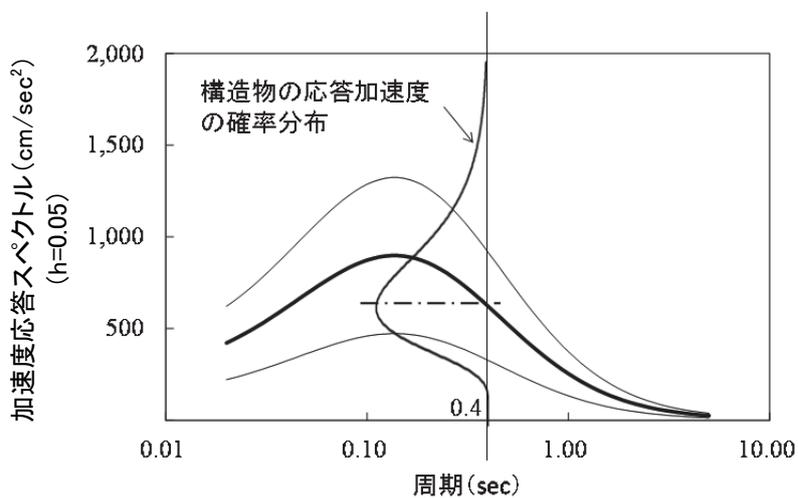


付図 6-5 特定の地震による最大層間変形のヒストグラムと確率分布

## A6.2 応答スペクトル法の利用

地震波形を多数推計し、さらに地震波毎に構造物の時刻歴解析を行うことは、多くの労力を必要とするため実務上困難である。そこで、リスク評価実務では、適切な距離減衰式を使い、対象地点での加速度応答スペクトルを求め、構造物の応答を評価する。付図 6-6 は加速度応答スペクトルの例であり、太線は平均値、細線は $\pm\sigma$  (標準偏差) を示している。また、図には、例として固有周期 0.4sec の構造物の応答加速度の確率分布を付記している。既往の距離減衰式は、誤差を対数標準偏差として統計的に評価していることから、特性値

(中央値や対数標準偏差)を含め、対数正規分布として求めることができる。さらに簡単な変換により、付図 6-5 に示した特定の地震による最大層間変形(任意の周期に対応)の確率分布を求めることができる。



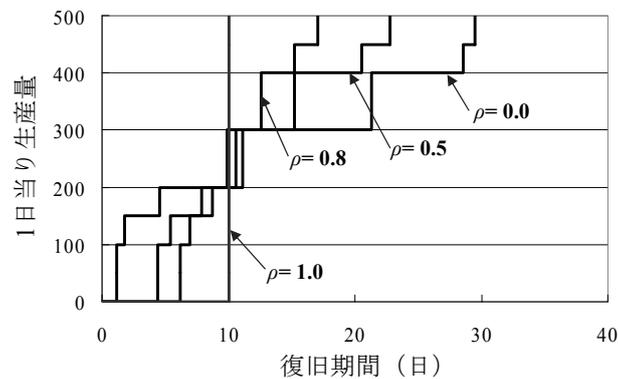
付図 6-6 距離減衰式による加速度応答スペクトルとその誤差

参考文献

- 1) 田中良一, その他: 首都圏に建つ超高層キャンパスと地域連携による地震防災に関する研究(その2) 首都直下地震の強震動予測, 建築学会大会, 構造Ⅱ, pp.815-816, 2008.9

## 付録－7 損傷相関の評価方法

確率論的地震リスク評価において、構造物相互の損傷相関を考慮することは重要な課題である。特に実務面からは、簡便かつより精度の高い評価手法が望まれている。付図 7-1 は、生産工場を対象に、損傷の相関係数を変化 ( $\rho=0.0, 0.5, 0.8, 1.0$ ) させた際の復旧曲線<sup>1)</sup>を示している。相関係数の違いによる復旧過程への影響は、大きいことが分かる。



付図 7-1 損傷相関の違いによる復旧曲線の比較<sup>1)</sup>

ここでは、損傷相関を考慮した組合せ事象の確率を、数値積分を使い評価する方法を解説する。

### A7.1 損傷相関係数

$n$  個の構造物があり、それぞれの耐力の確率変数を  $C_i, i=1\sim n$ 、作用地震動の確率変数を  $R_i, i=1\sim n$  とする。各確率変数は対数正規分布に従うものとし、それぞれ以下のように定義する。

$$\left. \begin{array}{l} f_{C_i}(\ln c | \lambda_{C_i}, \zeta_{C_i}) \\ f_{R_i}(\ln r | \lambda_{R_i}, \zeta_{R_i}) \end{array} \right\}, i=1\sim n \quad (\text{付 7-1})$$

ここに、 $\lambda$  は対数の平均値、 $\zeta$  は対数標準偏差である。次に、構造物の損傷状態を以下のように定義する。

$$C_i/R_i = F_i \leq 1.0, i=1\sim n \quad (\text{付 7-2})$$

ここに、 $C_i, i=1\sim n$  は互いに独立、 $R_i, i=1\sim n$  は一定の相関を仮定する。そして、 $F_i$  と  $F_j$  との共分散をとり、構造物間の損傷相関係数を求めると次式のようなになる。

$$\rho_{F_{ij}} = \frac{\rho_{R_{ij}} \zeta_{R_i} \zeta_{R_j}}{\zeta_{F_i} \zeta_{F_j}}, i \neq j \quad (\text{付 7-3})$$

ここに、 $\zeta_{Fi}$ ,  $i=1\sim n$  は複合偏差である。また、 $\rho_{Rij}$  は工学的基盤最大加速度（以下 PBA）の距離の相関係数であり、次式<sup>2)</sup>で表される。

$$\rho_{Rij} = \exp(-d_{ij} / 27.1) \quad (\text{付 7-4})$$

ここに、 $d_{ij}$  は構造物が立地するサイト間の相対距離である。ここで、複合偏差  $\zeta_{Fi} = \zeta_F$ ,  $i=1\sim n$  とする。また、(付 7-2)式より次式の関係を得る。

$$\zeta_F^2 = \zeta_{Ci}^2 + \zeta_{Ri}^2, \quad i=1\sim n \quad (\text{付 7-5})$$

$$\lambda_{Fi} = \lambda_{Ci} - \lambda_{Ri}, \quad i=1\sim n \quad (\text{付 7-6})$$

#### A7.2 損傷相関を考慮した組合せ事象の確率

Curnow and Dunnett<sup>3)</sup>が示した多次元同時確率分布の多重積分から、1重積分に帰着する方法を用いて、損傷相関を考慮した組合せ事象の確率を求める。例えば、 $n$  個の構造物の損傷の積事象確率は、次式のように誘導できる。

$$p(Z_i \leq h_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n \left[ \Phi \left( \frac{h_i + \theta_i y}{\sqrt{1 - \theta_i^2}} \right) \right] \cdot \phi(y) dy \quad (\text{付 7-7})$$

ここに、 $\Phi$ ,  $\phi$  は標準正規分布の累積分布関数、確率密度関数である。 $h_i$  は同時確率分布の積分範囲である。また、変数  $\theta_i$  は確率変数  $Z_i$ ,  $i=1\sim n$  の相関係数  $\rho_{Fij}$  と次式のような関係にある。

$$\rho_{Fij} = \theta_i \theta_j, \quad i \neq j, \quad 0 < \theta_i \leq 1 \quad (\text{付 7-8})$$

積分範囲  $h_i$ ,  $i=1\sim n$  は、(付 7-2)式より  $0 < F_i \leq 1.0$  であり、 $\ln(1.0)=0.0$  に注意すると以下となる。

$$h_i = -\lambda_{Fi} / \zeta_F, \quad i=1\sim n \quad (\text{付 7-9})$$

さらに、(付 7-6)式より  $h_i$  は次式となる。

$$h_i = \frac{-(\lambda_{Ci} - \lambda_{Ri})}{\zeta_F}, \quad i=1\sim n \quad (\text{付 7-10})$$

(付 7-10)式から得られる積分範囲，ならびに(付 7-3)式から得られる損傷相関係数  $\rho_{Fij}$  を(付 7-8)式に適用し，変数  $\theta_i$ ， $i=1\sim n$  を求め，(付 7-7)式に適用すれば，損傷相関を考慮した積事象確率を求めることができる．様々な組合せ事象の確率も同様に評価できる。

### A 7.3 構造信頼性にもとづく組合せ事象の確率

構造物の損傷確率は、一般的に構造信頼性において用いられる 2 山モデル (付図 4-4 を参照) から求めることができる。ここでは、2 山モデルを使い、損傷相関を考慮した積事象確率の評価式を誘導する<sup>4)</sup>。

準備として、作用地震動の確率変数  $R_i, i=1\sim n$  は完全相関と仮定する。つまり  $\rho_{Rij}$  は 1.0 となる。これにより、次式が誘導できる。

$$\theta_i = \frac{\zeta_{Ri}}{\zeta_F}, i \sim n \quad (\text{付 7-11})$$

次に、(付 7-7)式の以下の項を取上げ、(付 7-11)式を代入する。

$$\Phi\left(\frac{\theta_i y + h_i}{\sqrt{1 - \theta_i^2}}\right) = \Phi\left(\frac{\frac{\zeta_{Ri}}{\zeta_F} y + h_i}{\sqrt{1 - \frac{\zeta_{Ri}^2}{\zeta_F^2}}}\right) = \Phi\left(\frac{\frac{\zeta_{Ri}}{\zeta_F} y + h_i}{\frac{\zeta_{Ci}}{\zeta_F}}\right)$$

さらに、(付 7-10)式を代入する。

$$= \Phi\left(\frac{\frac{\zeta_{Ri}}{\zeta_F} z + \frac{\lambda_{Ri} - \lambda_{Ci}}{\zeta_F}}{\frac{\zeta_{Ci}}{\zeta_F}}\right) = \Phi\left(\frac{\zeta_{Ri} z + \lambda_{Ri} - \lambda_{Ci}}{\zeta_{Ci}}\right)$$

改めて、(付 7-7)式を書き直すと、

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n \left[ \Phi\left(\frac{\theta_i y + h_i}{\sqrt{1 - \theta_i^2}}\right) \right] \phi(y) dy$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n \Phi \left( \frac{\zeta_{Ri} y + \lambda_{Ri} - \lambda_{Ci}}{\zeta_{Ci}} \right) \phi(y) dy \quad (\text{付 7-12})$$

ここで、積分変数の変換  $y \rightarrow x$  を行う。

$$x = \exp(y\zeta_{Ri} + \lambda_{Ri}), \quad dy = \frac{1}{\zeta_{Ri}} \frac{1}{x} dx, \quad y = \frac{\ln x - \lambda_{Ri}}{\zeta_{Ri}} \quad (\text{付 7-13})$$

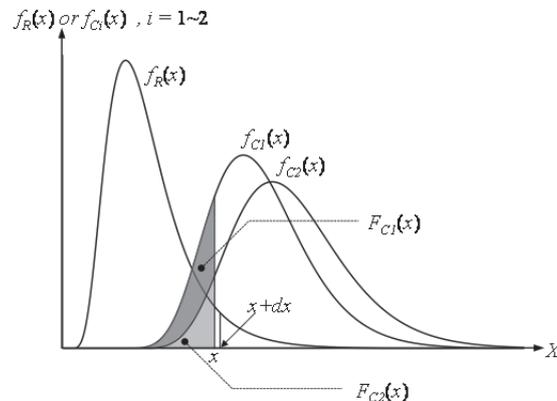
積分範囲が  $-\infty$  から  $0$  に変わることに注意し、(付 7-12)式に適用する。

$$\begin{aligned} &= \int_0^{\infty} \prod_{i=1}^n \Phi \left( \frac{\ln x - \lambda_{Ri} + \lambda_{Ri} - \lambda_{Ci}}{\zeta_{Ci}} \right) \phi \left( \frac{\ln x - \lambda_{Ri}}{\zeta_{Ri}} \right) \frac{1}{x} \frac{1}{\zeta_{Ri}} dx \\ &= \int_0^{\infty} \prod_{i=1}^n \Phi \left( \frac{\ln x - \lambda_{Ci}}{\zeta_{Ci}} \right) \phi \left( \frac{\ln x - \lambda_{Ri}}{\zeta_{Ri}} \right) \frac{1}{x} \frac{1}{\zeta_{Ri}} dx \end{aligned} \quad (\text{付 7-14})$$

$n$  を 2 とし、2つの構造物を取上げると、(付 7-14)式は以下となる。

$$= \int_0^{\infty} F_{C1}(x) F_{C2}(x) f_R(x) dx \quad (\text{付 7-15})$$

ここに、 $F_C(x)$  は対数正規分布の非超過確率関数、 $f_R(x)$  は対数正規密度関数である。付図 7-2 は、完全相関である作用地震動の確率分布と、2つの構造物の耐力の確率分布を概念的に示しもので、図のハッチングは作用地震動  $x$  の非超過確率をそれぞれ示している。(付 7-15) 式の  $F_{C1}(x)$ 、 $F_{C2}(x)$  がこれらに相当する。



付図 7-2 作用地震動と 2つの構造物の耐力の確率分布の概念図

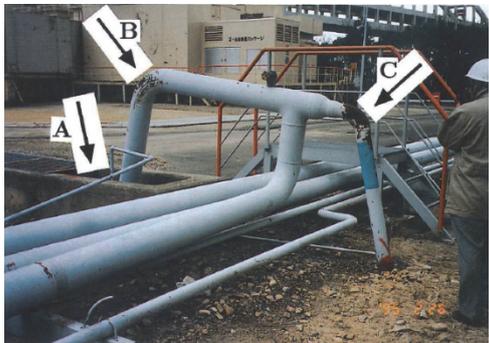
参考文献

- 1) 中村孝明, 境茂樹, 吉川弘道: 損傷相関を考慮した地震時システム性能評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 76 卷, 第 661 号, pp.713-719, 2011.3
- 2) Wang M., and T. Takada: Macrospatial Correlation Model of Seismic Ground Motions, Earthquake Spectra, Vol.21, No.4, pp.1137-1156, Nov.2005.
- 3) Curnow, R. N. and Dunnett, C. W.: The numerical evaluation of certain multivariate normal integrals. *Annals of Math. Stat.*, Vol.33, No.2, Sep., pp.571-579, 1962.
- 4) 望月智也, 中村孝明: 地震による構造物の損傷相関の評価方法に関する研究, 構造物の安全性および信頼性 Vol.8, JCOSSAR2015 論文集, pp.278-283, 2015.10.

付録－8 過去の被害事例

A8.1 臨海部コンビナート施設の被害写真

<p>水張り中の球形タンクの支柱の座屈<sup>1)</sup></p>	<p>球形タンクの火災<sup>1)</sup></p>
<p>球形タンクの火災<sup>1)</sup></p>	<p>鎮火後の発災施設<sup>1)</sup></p>
<p>津波によるバースの被害<sup>2)</sup></p>	<p>津波による護岸の被害<sup>2)</sup></p>
<p>建屋と配管の崩壊<sup>3)</sup></p>	<p>石油製品タンクの座屈<sup>3)</sup></p>

	
<p>水タンクのパルブまわりの座屈<sup>3)</sup></p>	<p>地盤の液状化によるタンクの沈下<sup>3)</sup></p>
	
<p>側方流動による地下埋設配管の損傷<sup>3)</sup></p>	<p>地盤の液状化による配管の損傷<sup>3)</sup></p>
	
<p>ポンプケーシングの破損<sup>3)</sup></p>	<p>配管支持柱の座屈<sup>3)</sup></p>

参考文献

- 1) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会高圧ガス及び火薬類保安分科会 高圧ガス部会: 第16回配布資料, [http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/016\\_02\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/016_02_00.pdf), 平成23年7月11日.
- 2) 総務省消防庁 消防研究センター: 東日本大震災におけるコンビナート被害、火災被害等の現地調査結果, 消防の動き 平成23年6月号 No.482, pp.12-14, [http://www.fdma.go.jp/ugoki/h2306/2306\\_06.pdf](http://www.fdma.go.jp/ugoki/h2306/2306_06.pdf)
- 3) 日本機械学会: 阪神・淡路大震災での機械設備の被災調査写真集, P.213, 1996.8.5.

## A8.2 過去の生じた地震被害の代表例

被害事例	アラスカ地震による石油タンク火災		
発生年月日	1964（昭和39）年3月27日		
地震名称	アラスカ地震	地震発生日時	27日 17時36分14秒
震源情報	北緯61度2分24秒 西経147度43分48秒 20km M8.4		
被害発生場所	アラスカ州 Valdez、Whittier、Seward、カリフォルニア州 Crescent City		
タンク種別 および被害形態	記載なし		
被害概要			
<p>●コンビナート被害</p> <p>◎アラスカ州</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Valdez では、地震と津波で石油タンクが破壊し、油が流出した。数時間後、小型船舶地の東にある燃料油貯蔵タンク群が出火し、全焼した。</li> <li>・Whittier では、津波により Union Oil、軍の石油タンクが傾き、油が流出、出火した。約8平方 km が焼失した。</li> <li>・Seward では、地震発生 30～45 秒後、Standard Oil Co.のタンクの配管とバルブが破損、油が漏洩した。タンクが傾き、海へ向かって滑り始め出火した。津波で火が広がり、他のタンクや鉄道のタンク貨車が次々と誘爆し、火災は数日間続いた。</li> </ul> <p>◎カリフォルニア州</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Crescent City では、地震前に3週続けて出された津波警報が空振りに終わっていたため、当局が警報発令をためらった。津波第3波で石油会社のタンクローリーがガレージに衝突、流出した油が配電盤などの電気火花で着火した。津波で火が広がり、石油タンクに延焼した。</li> </ul>			
●人的被害 データなし			
●環境影響 データなし			
●対応・対策 ・1967年、West Coast & Alaska Tsunami Warning Center (WC&ATWC) 設立 (Alaska 州 Palmer)			

被害事例	宮城県沖地震によるタンクの底板破損および重油の流出		
発生年月日	1978（昭和 53）年 6 月 12 日		
地震名称	宮城県沖地震	地震発生日時	12 日 17 時 14 分 25 秒
震源情報	北緯 38 度 8.9 分 東経 142 度 16.6 分 42km M7.2		
被害発生場所	東北石油（株）仙台製油所（宮城県仙台市）		
タンク種別 および被害形態	記載なし		
<b>被害概要</b>			
<p>●コンビナート被害</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・製油所のタンク 77 基のうち重油タンク 3 基で、腐食減肉していたアニュラ板が、地震の震動による低サイクル疲労で、隅肉溶接継手止端部に沿って亀裂が発生、3 基で合せて重油計 98,100 キロリットルが流出した。</li> <li>・流出した油がタンク基礎を洗掘し、亀裂が拡大した（破断長さ 20～40m）。</li> </ul>			
<p>●人的被害</p> <p>データなし</p>			
<p>●環境影響</p> <p>データなし</p>			
<p>●対応・対策</p> <p>データなし</p>			

被害事例	千葉県東方沖地震による塩酸ガスの漏洩		
発生年月日	1987（昭和 62）年 12 月 17 日		
地震名称	千葉県東方沖地震	地震発生日時	17 日 11 時 8 分 17 秒
震源情報	北緯 35 度 22.5 分 東経 140 度 29.6 分 58km M6.7		
被害発生場所	千葉塩ビモノマー本社工場（千葉県袖ヶ浦市）		
タンク種別 および被害形態	記載なし		
<b>被害概要</b>			
<p>●コンビナート被害</p> <p>・塩ビモノマー製造工程で、地震による緊急停止操作によりインターロック作動、塩酸ガスが自動的に排ガス除外塔に切り替わった。しかし苛性ソーダ溶液循環ポンプが一時停止していたため、塩酸ガスが吸収除外されず約 2 分間放散した。</p>			
<p>●人的被害</p> <p>・隣接する企業の従業員 2 名が病院で点滴治療を受ける。</p>			
<p>●環境影響</p> <p>・11:35 頃、地元消防からホットラインによる通報および地元行政機関のパトロール車からの臭気情報により塩酸ガス放散と判断した。</p>			
<p>●対応・対策</p> <p>データなし</p>			

被害事例	釧路沖地震によるタンクの破損およびアスファルトの流出		
発生年月日	1993（平成5）年1月15日		
地震名称	釧路沖地震	地震発生日時	15日 20時6分7秒
震源情報	北緯42度55.2分 東経144度22.4分 101km M7.5		
被害発生場所	昭和シェル石油釧路油槽所（北海道釧路市）		
タンク種別 および被害形態	円錐屋根タンク（容量1035キロリットル）：サクシオンヒーターの荷重により座屈		
<b>被害概要</b>			
<p>●コンビナート被害</p> <p>・アスファルトタンク5基のうちの1基（円錐屋根タンク、内径10.64m、高さ12.18m、側板（8段）および底板厚6mm、容量1035キロリットル）で、側板最下段に接続されているサクシオンヒーターの重量が側板に直接かかっていたため、地震動により、局部的に設計水平震度を超える力が作用（推定）。タンク最下段側板の底部から約30～40cmの範囲全周にわたり座屈した。サクシオンヒーター下部の側板肉厚測定窓取り付け溶接部他1ヶ所で破断（幅3cm×長さ30cm、幅3cm×長さ5cm）。160℃で加熱貯蔵していたアスファルト971キロリットルのうち約900キロリットルが2ヶ所から噴出した。構内各所を土嚢で封鎖したが、土嚢のポリエチレン製袋が熱で溶け崩れるなどしてアスファルトが溢れ出し、南側の港湾道路（幅8m）、側溝集水柵から配水管を通して釧路西港内に約246キロリットル（推定）流出した。16日1:30頃、流出がほぼ終わった。</p>			
<p>●人的被害</p> <p>データなし</p>			
<p>●環境影響</p> <p>データなし</p>			
<p>●対応・対策</p> <p>・地震直後から119番全27回線はふさがりっぱなしで繋がらず、隣の会社社員が消防本部に駆け込み通報。しかし、消防隊が出払っており、4隊が到着した時にはすでに側溝から配水管に流入した。</p> <p>・西港の岸壁陥没でオイルフェンス巻取機および展張船吊り架台が使用不能となったため、南港のオイルフェンスを展張した。</p>			

被害事例	北海道南西沖地震によるタンク火災		
発生年月日	1993（平成5）年7月12日		
地震名称	北海道南西沖地震	地震発生日時	12日 22時17分12秒
震源情報	北緯42度46.9分 東経139度10.8分 35km M7.8		
被害発生場所	奥尻島		
タンク種別 および被害形態	記載なし		
<b>被害概要</b>			
<p>●コンビナート被害</p> <p>・奥尻島で町有灯油タンク（800キロリットル2基）が崖崩れで壊れ、灯油が防油堤内に流出した。</p>			
<p>●人的被害</p> <p>データなし</p>			
<p>●環境影響</p> <p>データなし</p>			
<p>●対応・対策</p> <p>データなし</p>			

被害事例	兵庫県南部地震によるタンク被害および重油の流出		
発生年月日	1995（平成7）年1月17日		
地震名称	兵庫県南部地震	地震発生日時	17日 5時46分52秒
震源情報	北緯34度35分54秒 東経135度2分6秒 15km M7.3		
被害発生場所	兵庫県および大阪府の臨海部		
タンク種別 および被害形態	<ul style="list-style-type: none"> <li>・タンク本体からの漏洩（側板の座屈による、神戸市）</li> <li>・重油の流出（不等沈下による、尼崎市）</li> </ul>		
<b>被害概要</b>			
<p>●コンビナート被害</p> <p>◎神戸市</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・タンク本体の不等沈下、本体側板の変形および亀裂による漏えい、アニュラ板の変形、アンカーボルトの破断・引き抜け、アース線の伸び・破断等が発生した。</li> <li>・990キロリットル側板が座屈、タンク本体からの漏えいが発生した。</li> <li>・スロッシングによる漏えいは6件生じており、少ない傾向にある。</li> <li>・地盤の液状化により、傾斜したタンクが157件生じた。</li> </ul> <p>◎尼崎市</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・タンクに生じた不等沈下の影響で第2バルブが破損し、C重油約40キロリットルが防油堤内に流出した（うち約600リットルが防油堤外に流出）。</li> </ul> <p>◎大阪府堺市・高石市</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・液体危険物タンク5基（固定屋根式4基、内部浮屋根式1基）が不等沈下を起こした。</li> </ul>			
<p>●人的被害</p> <p>データなし</p>			
<p>●環境影響</p> <p>データなし</p>			
<p>●対応・対策</p> <p>・「大規模地震発生時における石油コンビナートの広域応援に関する調査検討委員会」を設置。現行の応援制度の調査、兵庫県南部地震の際の広域応援の実態を踏まえた広域応援の問題点の抽出、自衛防災組織の広域応援の必要性およびあり方について検討。</p>			

被害事例	イズミット地震による石油タンクの火災		
発生年月日	1999（平成 11）年 8 月 17 日		
地震名称	イズミット地震	地震発生日時	17 日 3 時 2 分
震源情報	北緯 41 度 42 分 7.2 秒 東経 29 度 59 分 13.2 秒 17km M7.3		
被害発生場所	Yarimca 石油精製プラント		
タンク種別 および被害形態	記載なし		
被害概要			
<p>●コンビナート被害</p> <p>・マルマラ海に面したイズミット湾にある国営石油会社テュプラスの Yarimca 石油精製プラント（処理能力 226,000 バレル／日、年間精製量 1,150 万トンでトルコ最大、周辺の石油化学工場にナフサなどの原料供給、国内の産業・民生用石油製品の約 3 分の 1 を供給、欧州へも輸出）で、原油タンク 1 基から出火し、大小のタンク 80 基（総量 70 万トンの原油）のうち 15 トン級タンク 7 基が激しく炎上、黒煙噴き上げる。道路が通行困難で、約 30 分後に消防隊到着。停電と断水で消火設備はほとんど作動しなかった。一旦鎮火の発表があったが、17 日午後から再燃。8 月 20 日 8:10、最後のタンクがほぼ鎮火。被害総額は推定 2 億ドル、うち 1.5 億ドルは保険が支払われる見込み（トスカイ国務省による）。</p>			
<p>●人的被害</p> <p>・付近に液化天然ガスタンクや 8,000 トンのアンモニアのある化学肥料プラントなどもあり、17 日夜、爆発の危険が高まったとして全従業員 1,200 人が避難した。市当局は半径 5km 以内の住民に避難勧告を出し、住民ら数千人は爆発をおそれ市内から避難した。</p>			
<p>●環境影響</p> <p>・破損したパイプから流出した石油、ガソリンなどでマルマラ海沿岸約 2km、海面 75ha が汚染された。</p>			
<p>●対応・対策</p> <p>データなし</p>			

被害事例	2003 年十勝沖地震によるタンク火災		
発生年月日	2003（平成 15 年）9 月 26 日		
地震名称	2003 年十勝沖地震	地震発生日時	26 日 4 時 50 分 7 秒
震源情報	北緯 41 度 46.7 分 東経 144 度 4.7 分 45km M8.0		
被害発生場所	出光北海道製油所（苫小牧市）		
タンク種別 および被害形態	<ul style="list-style-type: none"> <li>・浮屋根式タンク 42 基が損傷、コーンルーフトank 6 基に変形等（スロッシングによる）</li> <li>・浮屋根式タンクでリング火災発生</li> </ul>		
被害概要	<p>●コンビナート被害</p> <p>・スロッシングにより、全 104 基のタンクのうち、浮屋根式タンク 51 基中 42 基損傷、うち 6 基で浮屋根沈没（3 万キロリットルタンク 1 基（ナフサ）と 4 万キロリットルタンク 3 基（灯油 2 基、スロップ 1 基）でポンツーン（浮屋根外周の浮き部分）が座屈、10 万キロリットルタンク 2 基（原油）では油面が波打って浮屋根が収縮変形しデッキプレートやポンツーンが破損開口）。浮屋根式以外の 53 基中コーンルーフトank 6 基で屋根の一部に変形等発生。</p> <p>・原油タンク No.30006（浮屋根式、直径 42.7m、高さ 24.39m、許可容量 32,778 キロリットル、出火時残量 31,160 キロリットル、固有周期約 7 秒）で、スロッシングにより、タンク内部から浮屋根上に溢流した原油から気化した可燃性蒸気が浮屋根上に滞留。この可燃性蒸気に、スロッシングで動揺した浮屋根とタンク付属品（ガイドポール等）の衝突時の金属接触火花、あるいは測定小屋が浮屋根に落下した時の摩擦衝撃火花、あるいは計装用電源ケーブル破断時の電気スパーク火花等が着火（推定）、タンク上部でリング火災発生。火のついた原油がスロッシングにより落下し、タンク北西側の原油払出し配管 2 本に生じた配管亀裂開口部から噴出した原油に引火した（推定）。</p> <p>●人的被害 データなし</p> <p>●環境影響</p> <p>・苫小牧市周辺に油の臭い、すす、消火剤の泡が飛散。多数の住民や小中学生などが体調不良を訴えた。</p> <p>・9 月 29 日 22:30 から 2 時間、火災現場から約 3km 離れた 3 ヶ所でベンゼン、トルエン、キシレン、ホルムアルデヒドの大気中濃度を測定した結果、ベンゼンの値が一時、1 立方 m あたり最大 8.2 と環境基準の 3 マイクログラムを上回った。</p> <p>●対応・対策</p> <p>・9 月 27 日 5:22、No.30006 原油タンクの固定泡消火設備起動。同設備の立ち上がり配管 4 本のうち 2 本で、下部のエアブロー弁（配管凍結防止用、バタフライ弁）のシートリン</p>		

グが焼損していたため、同弁から多量の泡混合液流出、供給圧力低下。さらに、冷却放水や他の泡放射で多量の消火水を使用したため、固定泡消火設備への供給元圧が低下。この結果、固定泡消火設備から、火災を覆うのに十分な泡が放出できなかった、あるいは、ほとんど放出されなかった。

・2002年11月、出光興産は、米国 Kidde Fire Fighting 社製の大容量泡放射砲2台を導入。

●被害総額

・出光興産北海道製油所の火災事故による損害額がタンクの復旧などで約100億円に上る（日経新聞・11月19日報道）

### A8.3 被害事例が掲載されている主な参考文献

- 1) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会高圧ガス及び火薬類保安分科会 高圧ガス部会: 第16回配布資料,  
[http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/016\\_haifu.html](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/016_haifu.html), 平成23年7月11日.
- 2) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会高圧ガス及び火薬類保安分科会 高圧ガス部会: 第17回配布資料,  
[http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/017\\_haifu.html](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/017_haifu.html), 平成23年9月28日.
- 3) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会高圧ガス及び火薬類保安分科会 高圧ガス部会: 第18回配布資料,  
[http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/018\\_haifu.html](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/018_haifu.html), 平成23年11月29日.
- 4) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会高圧ガス及び火薬類保安分科会 高圧ガス部会: 第19回配布資料,  
[http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/019\\_haifu.html](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/019_haifu.html), 平成24年1月24日.
- 5) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会高圧ガス及び火薬類保安分科会 高圧ガス部会: 第20回配布資料,  
[http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/020\\_haifu.html](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001815/020_haifu.html), 平成24年3月7日.
- 6) 高圧ガス保安協会: 高圧ガス設備の液状化対策, P.176, 平成20年12月15日.
- 7) 総務省消防庁 消防研究センター: 東日本大震災におけるコンビナート被害、火災被害等の現地調査結果, 消防の動き 平成23年6月号 No.482, pp.12-14,  
[http://www.fdma.go.jp/ugoki/h2306/2306\\_06.pdf](http://www.fdma.go.jp/ugoki/h2306/2306_06.pdf)
- 8) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告 機械編 機械設備の被害, P.428, 1998年8月.
- 9) 日本機械学会: 阪神・淡路大震災での機械設備の被災調査写真集, P.213, 1996.8.5.

**臨海部コンビナートの地震リスクマネジメント  
ガイドライン**

平成28年 3月 発行

編集・発行 一般財団法人 産業施設防災技術調査会  
〒231-0014

神奈川県横浜市中区常盤町3丁目24番地 サンビル10F

TEL 045-663-4031

FAX 045-212-1721

<http://www.idmc.or.jp>